

Université de la Réunion

Résumé d'ouvrages et de travaux

Document de synthèse présenté par Samuel NIBOUCHE
pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches

Table des matières

1e partie	Présentation générale	1
1.1.	Etat civil.....	1
1.2.	Grades et titres.....	1
1.3.	Activités de recherche et parcours professionnel.....	1
1.4.	Activités d'encadrement	2
1.4.1.	Thèses.....	2
1.4.2.	Stages diplômants de fin d'étude.....	2
1.4.3.	Coopérants du Service National & Volontaires civils (CSN & VCAT)	2
1.4.4.	Autres stages.....	3
1.5.	Projets : coordination et participation	3
1.6.	Activités d'expertise	4
1.7.	Activités d'enseignement	4
1.8.	Evaluation d'articles scientifiques.....	4
1.9.	Organisation de séminaires et conférences	4
2e partie	Responsabilités de recherche et activités d'encadrement.....	5
2.1.	Introduction	5
2.2.	Biologie et écologie d' <i>Helicoverpa armigera</i> et modélisation de l'évolution de sa résistance aux toxines de Bt.....	6
2.2.1.	Biologie et écologie d' <i>Helicoverpa armigera</i> dans les agroécosystèmes en zone soudanienne	7
2.2.2.	Modélisation de l'évolution de la résistance aux toxines de Bt	12
2.3.	Seuils d'intervention contre les chenilles de la capsule du cotonnier ..	15
2.3.1.	Vulgarisation de seuils d'intervention en Afrique subsaharienne.....	16
2.3.2.	Echantillonnage	17
2.3.3.	Evaluation des seuils de dégât économique.....	22
2.4.	Résistance des plantes aux insectes phytophages.....	26
2.4.1.	Résistance du cotonnier aux pucerons et aux Typhlocybae	26
2.4.2.	Résistance de la canne à sucre au foreur de tige ponctué <i>Chilo sacchariphagus</i>	27
3e partie	Perspectives de recherche	31
3.1.	Diversité et spécificité des résistances de la canne à sucre à la maladie de la feuille jaune	31
3.1.1.	Enjeux et état des connaissances	31
3.1.2.	Objectifs.....	32

3.2.	Identification de marqueurs de gènes d'intérêt chez la canne à sucre	34
3.2.1.	Enjeux et état des connaissances	34
3.2.2.	Objectifs.....	35
4e partie	Publications scientifiques et documents à vocation de transfert.....	37
4.1.1.	Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture, répertoriées dans des bases de données internationales.....	37
4.1.2.	Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture, non répertoriées dans des bases de données internationales.....	38
4.1.3.	Articles dans des revues sans comité de lecture.....	38
4.1.4.	Communications avec actes dans un congrès international ou national	38
4.1.5.	Communications orales sans actes dans un congrès international ou national	41
4.1.6.	Communications par affiche dans un congrès international ou national	41
4.1.7.	Ouvrages scientifiques	42
4.1.8.	Ouvrages de vulgarisation.....	42
4.1.9.	Thèses soutenues	42
4.1.10.	Logiciels.....	42
4.1.11.	Autres publications.....	43
	Bibliographie.....	44

1e partie Présentation générale

1.1. Etat civil

Samuel NIBOUCHE

Nationalité : Française

Date de naissance : 24/06/1966

Adresse professionnelle : Cirad
UMR PVBMT
Pôle de protection des plantes - 3P
7 chemin de l'IRAT
97410 Saint-Pierre Réunion
Téléphone : +262 2 62 49 92 38
Fax : +262 2 62 49 92 93
Adresse électronique : samuel.nibouche@cirad.fr

1.2. Grades et titres

- 1994: Doctorat en sciences agronomiques, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.
- 1988: Ingénieur Agronome, spécialité protection des cultures, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse.

1.3. Activités de recherche et parcours professionnel

- depuis mai 2003 : chercheur CIRAD, en poste à l'UMR PVBMT à la Réunion, recherches sur la résistance génétique aux bioagresseurs chez la canne à sucre.
- octobre 1995 à juin 2002: chercheur CIRAD, en poste à l'Institut de Recherche Agricole pour le Développement au Cameroun (IRAD), recherches sur la lutte intégrée contre les ravageurs de la culture cotonnière.
- octobre 1989 à juin 1995 : chercheur CIRAD, en poste à l'Institut de l'Environnement et des Recherches Agricoles au Burkina Faso (INERA), recherches sur la lutte intégrée contre les ravageurs de la culture cotonnière.
- juin 1988 à septembre 1989 : service national au CIRAD, en poste à l'Institut de l'Environnement et des Recherches Agricoles au Burkina Faso (INERA), recherches sur la lutte intégrée contre les ravageurs de la culture cotonnière.

1.4. Activités d'encadrement

1.4.1. Thèses

- co-encadrement, depuis fin 2007, de la thèse de M. Benjamin Fartek, sur le thème « Diversité et spécificité des résistances de la canne à sucre à la maladie de la feuille jaune », Université de la Réunion.
- participation, depuis 2006, au comité de thèse de M. Joseph Achaleke, sur le thème « Factors affecting pyrethroid resistance in *Helicoverpa armigera* in Cameroon », Université de Dschang, Cameroun.
- co-encadrement, de 2000 à 2002, du PhD de M. Jacques Beyo, intitulé « Sampling for decision making in threshold-based control of cotton bollworms in North Cameroon », Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria. 3 articles dans des revues à facteur d'impact [4.1.1.5 ; 4.1.1.8 ; 4.1.1.9], 6 communications [4.1.4.6 ; 4.1.4.8 ; 4.1.4.9 ; 4.1.4.12 ; 4.1.4.18 ; 4.1.4.22]. Soutenance 25 mai 2008.

1.4.2. Stages diplômants de fin d'étude

- Lambert, J. 2005. Utilisation des dégâts foliaires pour évaluer la résistance variétale de la canne à sucre au foreur ponctué, *Chilo sacchariphagus* (Bojer). Haute École Charleroi – Europe Institut Supérieur Catholique.
- Poblador, N. 2000. Mise au point de méthodes pour l'évaluation de la résistance du cotonnier au puceron *Aphis gossypii* Glover. Escuela Superior de Ingenieros Agronomos y de Montes Universidad de Cordoba.
- Fesneau, A. 1999. Résistance d'*Aphis gossypii* Glover aux organophosphorés et aux carbamates en culture cotonnière au Nord Cameroun. ISTOM.
- Barvec, F. 1998. Contribution à l'étude des prédateurs d'*Aphis gossypii* Glover (Homoptera : Aphididae) au sein des systèmes de culture de la zone cotonnière du Nord-Cameroun. ISTOM.
- de Chazeaux, R. 1997. La maladie des cotonniers rouges au Nord-Cameroun : identification des causes de phénomène, étude de méthodes de lutte. ISTOM.

1.4.3. Coopérants du Service National & Volontaires civils (CSN & VCAT)

- Streito, J.-C. (1994-1995) Inventaire faunistique de l'entomofaune auxiliaire du cotonnier au Burkina Faso. 2 articles [4.1.1.15 ; 4.1.3.6].
- de Chazeaux, R. (1998-1999) Etude de la Maladie des Cotonniers Rouges au Nord-Cameroun. 1 article [4.1.3.5], 3 communications [4.1.4.26 ; 4.1.4.20 ; 4.1.4.21], 1 poster [4.1.6.1].

- Babin, R. (1999-2000) Echantillonnage des chenilles de la capsule du cotonnier. 2 articles [4.1.1.5 ; 4.1.1.8], 4 communications [4.1.4.17 ; 4.1.4.19 ; 4.1.4.20 ; 4.1.4.22].
- Pédrón, F. (2000-2001) Résistance variétale du cotonnier aux pucerons et jassides. 1 communication [4.1.4.16].
- Escalon, L. (2001-2002) Résistance aux insecticides chez le puceron *Aphis gossypii*. 1 communication [4.1.4.14].
- Linderme, D. (2007-2008) Durabilité de la lutte biologique contre le ver blanc de la canne à sucre à la Réunion, co-encadrement.
- Perefarres, F. (2008) Durabilité de la lutte biologique contre le ver blanc de la canne à sucre à la Réunion, co-encadrement.
- Calmès, C. (2009) Durabilité de la lutte biologique contre le ver blanc de la canne à sucre à la Réunion, co-encadrement.

1.4.4. Autres stages

- Hattik, C., Poncharville, L. 2009 (en cours) Caractérisation de la variabilité génétique de la canne à sucre pour la résistance à la maladie de la feuille jaune. Stage M1, Université de la Réunion. co-encadrement.
- Atiama T., Avaby A. 2007. Caractérisation de la variabilité génétique de la canne à sucre pour la résistance à la maladie de la feuille jaune causée par le Sugarcane Yellow Leaf Virus (SCYLV). Stage M1, Université de la Réunion. co-encadrement.
- Picard, C. 2006. Approche écophysiological des interactions entre la canne à sucre et le foreur ponctué (*Chilo sacchariphagus*) – Étude méthodologique. Stage de césure. École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.
- Fiorelli, C. 2000. Résistance d'*Aphis gossypii* Glover aux organophosphorés et aux carbamates en culture cotonnière au Nord Cameroun. Stage de 2^e année. École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.

1.5. Projets : coordination et participation

- depuis 2009 : Coordination du projet Délicas « Association mapping et phénotypage par modèle pour l'identification de marqueurs moléculaires liés à l'élaboration et à la limitation du rendement chez la canne à sucre ». Budget de 800 k€ sur 4 ans, financement ANR, programme de génomique végétale Génoplante.

- 2007-2008 : Animation d'un groupe de travail « *Decision support systems for pest control* » au sein du réseau d'excellence européen Endure, European Network for the Durable Exploitation of Crop Protection Strategies, financement dans le cadre du FP6 de l'Union Européenne.
- 1999-2001 : Coordination du work-package « *Innovations techniques pour la Culture Cotonnière* » au sein du PRASAC (Pôle de Régional de Recherche Appliquée au Développement des Savanes d'Afrique Centrale). Budget de 130 k€ sur 3 ans, financement du Ministère Français des Affaires Etrangères.

1.6. Activités d'expertise

Nibouche, S. 1998. Rapport d'expertise sur les manifestations d'une pullulation inhabituelle d'aleurodes en culture cotonnière. Rapport de mission au Burkina Faso du 24 septembre au 1^{er} octobre 1998. Cirad, Montpellier, France, 10 pp.

1.7. Activités d'enseignement

Cours en M1 BEST à l'Université de la Réunion : « Lutte chimique contre les insectes et seuils d'intervention », 4 h en 2007 et en 2008.

1.8. Evaluation d'articles scientifiques

- 2008, *Entomologia Experimentalis et Applicata*, manuscrit EEA-2008-0183.R1.
- 2008, *Fruits*, manuscrit 08/115/Dossier 08.029.
- 2008, *Environment, Development and Sustainability*, manuscrit ENVI279.
- 2005, *Cahiers Agricultures*, manuscrit AGR/04/10/16.

1.9. Organisation de séminaires et conférences

- 2002 : Atelier sur la résistance des insectes aux insecticides en Afrique de l'ouest et du centre, Maroua, Cameroun (20 participants).
- 1991 : Réunion de coordination de recherche phytosanitaire cotonnière, Ouagadougou, Burkina Faso (150 participants).

2e partie Responsabilités de recherche et activités d'encadrement

2.1. Introduction

Ma formation d'ingénieur agronome spécialisé en protection des cultures, s'est déroulée au sein de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse. A l'issue de cette formation, j'ai été recruté par l'IRCT (Institut de Recherche du Coton et des Textiles Exotiques), au sein du CIRAD, pour seize mois sur un poste de volontaire du service national. Ce séjour à Bobo-Dioulasso au Burkina Faso s'est prolongé par un recrutement par le CIRAD en 1989 sur le même poste. C'est durant cette affectation au Burkina Faso que j'ai pu préparer ma thèse de doctorat en sciences agronomiques, soutenue en 1994 à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier sous la direction de S. Poitout. Après sept ans passés au Burkina Faso, j'ai rejoint une affectation à Maroua au Nord Cameroun de 1995 à 2002. A partir de 2003, j'ai intégré l'UMR PVBMT à Saint-Pierre à la Réunion.

La première phase de mon activité de recherche, de 1989 à 2002, a été consacrée à la lutte intégrée contre les ravageurs du cotonnier. Ces travaux ont été menés dans le cadre d'une coopération entre le CIRAD, les instituts de recherche agronomique nationaux et des sociétés cotonnières privées, INERA et SOFITEX au Burkina Faso, IRAD et SODECOTON au Cameroun.

Un premier volet de ce travail a été consacré à l'étude de la biologie et de l'écologie de la noctuelle *Helicoverpa armigera*, appliquée ultérieurement au développement d'un modèle prédictif d'évolution de la résistance aux cotonniers transgéniques Bt.

Un second volet a été consacré à l'appui à la mise en œuvre de stratégies d'intervention sur seuil contre les chenilles de la capsule. Le premier axe de ce travail a porté sur la mise au point de plans d'échantillonnage, au travers de l'étude des lois statistiques de distribution des chenilles et de leur répartition spatiale intra parcelle et intra plante. Le second axe de ce travail a porté sur la modélisation du comportement alimentaire des chenilles, en vue de modéliser les pertes de rendement qu'elles occasionnent. Un troisième axe a été consacré à la mise au point d'outils et méthodes permettant l'adoption de traitements sur seuil par les paysans.

La seconde phase de mon activité de recherche, à partir de 2003, a été consacrée à l'exploitation des ressources génétiques de la canne à sucre pour la résistance aux bioagresseurs. Des travaux menés de 2000 à 2002 m'avaient déjà permis d'aborder le thème de la résistance des plantes aux insectes en travaillant sur la résistance du cotonnier aux pucerons et aux Typhlocybae. De 2003 à 2008, mes travaux ont porté sur la résistance variétale de la canne à sucre au foreur de tiges *Chilo sacchariphagus* : mise au point de méthodes de criblage pour la sélection variétale, exploration de la diversité génétique des résistances au sein du germplasm, analyse du mécanisme de résistance chez une variété résistante et recherche de QTL de résistance.

Dans ce document, j'expose la démarche de recherche suivie dans les projets auxquels j'ai participé au cours de ma carrière, en la structurant autour des trois thèmes suivants :

- la biologie et l'écologie d'*H. armigera* et la modélisation de l'évolution de la résistance de ce ravageur aux toxines de Bt,
- les seuils d'intervention pour la lutte contre les chenilles de la capsule du cotonnier,
- la résistance des plantes aux insectes phytophages.

2.2. Biologie et écologie d'*Helicoverpa armigera* et modélisation de l'évolution de sa résistance aux toxines de Bt

Helicoverpa armigera (Hübner, 1808), Lepidoptera, appartient à la famille des Noctuidae, sous-famille des Heliiothinae. *H. armigera* possède une vaste aire de répartition qui exclut cependant le continent américain, entre les 40^e parallèles nord et sud. Extrêmement polyphage, *H. armigera* s'attaque au moins à 217 espèces ou genres de plantes hôtes, appartenant à 50 familles (Nibouche 1999). C'est un ravageur majeur de cultures telles que le cotonnier, la tomate, le sorgho, le pois d'Angole ou le pois chiche.



Figure 1 Chenille d'*Helicoverpa armigera* sur capsule de cotonnier (photo J.-C. Streito).

En culture cotonnière, le contrôle d'*H. armigera* a longtemps reposé sur la lutte chimique. Cependant, l'efficacité de la lutte chimique a été fortement compromise par l'apparition de résistances du ravageur à quasiment toutes les familles d'insecticides dans la plupart des régions du globe. Depuis une quinzaine d'années, les méthodes de lutte s'orientent vers le déploiement de cotonniers Bt, variétés transgéniques produisant des toxines de *Bacillus thuringiensis* Berliner. Les cotonniers Bt ont tout d'abord été déployés aux USA et en Australie, ils sont maintenant largement répandus en Chine et en Inde, ainsi qu'en Amérique du Sud (Brookes et Barfoot 2006). En Afrique, l'Afrique du Sud a été le premier pays à adopter cette technologie. La diffusion des cotonniers Bt est en train de débiter au Burkina Faso (Vitale *et al.* 2008), et il est probable que cette diffusion gagne dans un avenir proche les autres pays cotonniers Subsahariens.

Que ce soit dans les années 80-90 avec les insecticides de synthèse, ou aujourd'hui avec les toxines de Bt, les risques d'émergence de résistances aux pesticides chez *H. armigera* sont une menace majeure pour la durabilité de ces méthodes de lutte. La mise au point de stratégies de prévention ou de gestion des résistances, ou IRM (*insecticide resistance management*), a été et reste un enjeu majeur pour la culture cotonnière.

En sus de connaissances sur les mécanismes biochimiques et le contrôle génétique des résistances, la définition de stratégies de prévention ou de gestion de la résistance suppose (i) l'acquisition de connaissances sur la biologie, l'écologie et la génétique des populations du ravageur et (ii) la mise au point d'outils prédictifs de l'effet des stratégies d'IRM sur l'évolution de la résistance. Ce sont ces deux points qui seront traités dans ce chapitre.

2.2.1. Biologie et écologie d'*Helicoverpa armigera* dans les agroécosystèmes en zone soudanienne

La question centrale de cette étude était de déterminer l'origine des populations d'*H. armigera* colonisant la culture cotonnière en zone soudanienne et d'identifier les plantes-hôtes hébergeant des populations contribuant à des flux de gènes significatifs avec les populations présentes sur le cotonnier.

Le cycle évolutif d'*H. armigera* a été largement étudié dans les parties de son aire de répartition présentant des hivers froids, où *H. armigera* est actif durant les mois les plus chauds et peut rester en diapause nymphale durant l'hiver (Poitout et Buès 1979, Wilson *et al.* 1979, Wardhaugh *et al.* 1980, Hmimina 1986). La reprise d'activité s'effectue au printemps par levée de la diapause et migrations d'adultes (Anglade 1969, Gregg *et al.* 1994). En zone intertropicale en Afrique, les situations sont plus variées. Lorsque le régime des pluies permet la présence permanente de plantes hôtes cultivées ou spontanées, l'activité d'*H. armigera* est continue (Coaker 1959, Viette 1967). Lorsqu'une saison sèche marquée provoque la disparition des cultures pluviales, *H. armigera* peut entrer en diapause (Parsons 1939, Reed 1965, Hackett et Gatehouse 1982), se reporter sur des plantes hôtes spontanées (Parsons 1939) ou sur des cultures irriguées de contre-saison (Nyambo 1988). Lorsque notre étude a débuté, peu d'informations étaient disponibles sur la biologie et l'écologie d'*H. armigera* dans les zones cotonnières subsahariennes. Situés en zone de climat soudanien, ces agroécosystèmes sont caractérisés par une longue saison sèche de 6 à 8 mois, a priori hostile pour la survie de l'insecte du fait de la disparition de ses plantes hôtes pluviales. Les seules données publiées concernaient des suivis de dynamique des populations en culture cotonnière (Silvie 1991). *H. armigera* était également connu comme un ravageur des cultures maraîchères irriguées de saison sèche, notamment de la tomate.

Notre problématique a été déclinée en trois questions :

- quels sont les agroécosystèmes et les plantes-hôtes qui hébergent *H. armigera* successivement au cours de l'année ?
- des diapauses sont-elles induites sous climat soudanien, si oui, quels en sont les facteurs d'induction et jouent-elles un rôle dans la manière dont *H. armigera* survit à la saison sèche ?
- quelle est l'intensité des flux migratoires entre les différentes zones écologiques ou agroécosystèmes colonisés par *H. armigera* ?

2.2.1.1. Agroécosystèmes et plantes hôtes colonisés

Un suivi pluriannuel de la dynamique des populations larvaires nous a permis de montrer que *H. armigera* colonisait les deux types d'agroécosystèmes, pluvial et irrigué, de manière asynchrone. En agroécosystème pluvial, les infestations larvaires se limitent à la saison des pluies et s'observent entre juin et novembre. Les premières populations s'installent sur *Cleome viscosa* L., espèce adventice et rudérale commune apparaissant avec les premières pluies. Les cultures sont colonisées à partir de juillet. Les principales cultures attaquées sont le maïs et le coton. Le sorgho est totalement indemne d'attaque. Quelques individus sont parfois observés sur l'arachide et sur le niébé. Le coton est chronologiquement la dernière plante hôte colonisée. Après la disparition du coton, aucune population n'a pu être observée sur la végétation spontanée en saison sèche. En agroécosystème irrigué, la plante hôte privilégiée d'*H. armigera* est la tomate, principalement attaquée en saison sèche. Les premières attaques se produisent courant juin, puis régressent fortement ou disparaissent en août et septembre, avant de reprendre de manière continue jusqu'en avril. Durant les mois mai et juin, les populations larvaires disparaissent durant 4 à 6 semaines. Sur des périmètres maraîchers où l'approvisionnement en eau ne permet pas l'irrigation durant toute la saison sèche, les infestations s'arrêtent plus tôt, parfois dès le mois de janvier.

2.2.1.2. Diapauses

La diapause permet à *H. armigera* de survivre durant les périodes hostiles. Si la diapause d'*H. armigera* a été bien étudiée en régions tempérées (Komarova 1959, Nel 1961, Poitout et Buès 1979, Wilson *et al.* 1979, Hmimina 1986), elle a en revanche fait l'objet de peu d'études en zone tropicale (Hackett et Gatehouse 1982, Hmimina *et al.* 1993), bien qu'il ait été démontré que les populations d'origine tropicale avaient des aptitudes à la diapause équivalente à celles de populations d'origine tempérée (Hmimina *et al.* 1993). *H. armigera* présente deux types de diapause selon la nature de l'induction: une diapause photopériodique et une diapause thermique.

La diapause photopériodique est induite par les jours courts, inférieurs à 12h (Komarova 1959). Au delà d'une température de 26 à 27°C, l'induction de cette diapause est inhibée (Roome 1979, Hackett et Gatehouse 1982). La levée de diapause ne s'effectue que si la température est supérieure à un seuil situé suivant les auteurs entre 16°C et 21°C (Wilson *et al.* 1979, Hmimina 1986, Buès *et al.* 1989). Il existe également seuil thermique maximal (inférieur à 34°C) au delà duquel la levée de diapause d'une partie des chrysalides est bloquée. En zone tropicale, ce mécanisme permettrait aux nymphes de rester en diapause durant la saison sèche et de reprendre leur développement lors la baisse des températures du sol sous l'effet des premières pluies (Hackett et Gatehouse 1982).

La diapause thermique est induite par l'action de températures basses sur les stades préimaginaux, indépendamment de la photopériode (Nel 1961, Hmimina 1986, Buès *et al.* 1989). L'induction se produit durant le stade nymphal, sous l'action de températures inférieures à un seuil compris entre 18 et 21°C (Giret et Couilloud 1982, Buès *et al.* 1989).

Diapause photopériodique

Les observations menées au Burkina Faso nous ont permis de mettre en évidence l'entrée en diapause d'une faible proportion de nymphes formées en saison sèche. Ce résultats a été obtenu (i) en collectant des chrysalides dans le sol de parcelles plusieurs mois après la fin des infestations larvaires et (ii) en observant des arrêts de développement dans un élevage mené sous insectarium, en conditions de températures naturelles. Les résultats montrent que les nymphes formées en octobre et novembre, à partir des dernières populations larvaires infestant le coton, sont susceptibles d'entrer en diapause. Cependant, la reprise de développement et l'émergence des adultes interviennent relativement rapidement, durant les mois de février et mars. Il n'a pas été possible d'observer au champ ou en insectarium de chrysalides suspendant leur développement jusqu'en juin, époque de reprise d'activité de l'insecte. En revanche, des nymphes formées en février et mars sont capables de différer la fin de leur nymphose jusqu'en mai-juin.

Une série d'expérimentations menées en laboratoire et en insectarium nous ont permis de confirmer (i) le rôle de la photopériode dans l'induction des diapauses observées, (ii) que des températures nocturnes basses permettaient l'induction de la diapause photopériodique en annulant partiellement l'effet inhibiteur des températures diurnes élevées, et (iii) que les hautes températures du sol pouvaient retarder la levée de diapause.

Diapause à haute température

Des études menées en laboratoire nous ont permis de mettre en évidence un mécanisme original d'arrêt de développement du stade nymphal induit par des températures élevées, similaire à celui décrit par chez *Heliothis virescens* (F.) par Butler *et al.* (1985). L'exposition de l'insecte à une température de 37°C à partir du 3^e stade larvaire déclenche une diapause chez 95% des mâles et chez 61% des femelles. L'induction de la diapause par les hautes températures doit débuter durant la vie larvaire pour être effective, le stade nymphal est insensible à l'induction. Aucune influence de la longueur du jour n'a été mise en évidence. Après un stockage à 37°C durant 60 jours, 64% des chrysalides en diapause ont survécu et la plupart d'entre-elles ont permis l'émergence d'adultes. Après 85 jours de stockage à 37°C, aucune chrysalide en diapause n'a survécu. Après transfert à 21°C, les chrysalides en diapause achèvent leur développement à la même vitesse que des chrysalides sans diapause, quelque soit la durée de leur stockage à 37°C. Cette diapause pourrait permettre à *H. armigera* de résister à la disparition des cultures maraîchères en fin de saison sèche, durant les mois d'avril et mai, mais ce rôle reste à mettre en évidence sur le terrain.

2.2.1.3. Structuration génétique des populations

Malgré ses limites (Hillis et Moritz 1990), l'analyse du polymorphisme enzymatique était dans les années 80-90 une des principales méthodes d'étude de la génétique des populations. Elle a été appliquée à l'étude de la structuration génétique des populations de plusieurs Noctuidae migrants en Australie, en Europe et en Amérique du Nord (Daly et Gregg 1985, Pashley 1985, Korman *et al.* 1993). Afin de déterminer l'intensité des flux de gènes entre les populations d'*H. armigera* en Afrique de l'Ouest, nous avons étudié le polymorphisme enzymatique de populations originaires du Burkina Faso et de Côte d'Ivoire. Cette étude a été élargie

à des populations d'Afrique du Nord et d'Europe du Sud afin de confronter la diversité observée en Afrique de l'Ouest à celle obtenue à une échelle géographique plus vaste.

Nous avons étudié la diversité génétique de 22 populations originaires du sud de la France, du Portugal, du Maroc, de Tunisie, du Burkina Faso et de Côte d'Ivoire (Figure 2), par analyse des fréquences d'allozymes à sept loci polymorphes. La comparaison des 22 populations a mis en évidence des différences significatives de fréquences alléliques à quatre loci, malgré une faible valeur de F_{ST} (0.007) révélatrice d'une absence de structuration. A une échelle géographique plus faible, nous avons observé deux situations. Les populations de France et du Portugal ont montré des différences de fréquences alléliques significatives malgré un F_{ST} faible (0.0099). En revanche, la comparaison des populations d'Afrique du Nord et de l'Ouest n'a révélé aucune différence significative de fréquences alléliques, même lorsque nous avons regroupé entre elles les populations situées au nord ou au sud du Sahara.

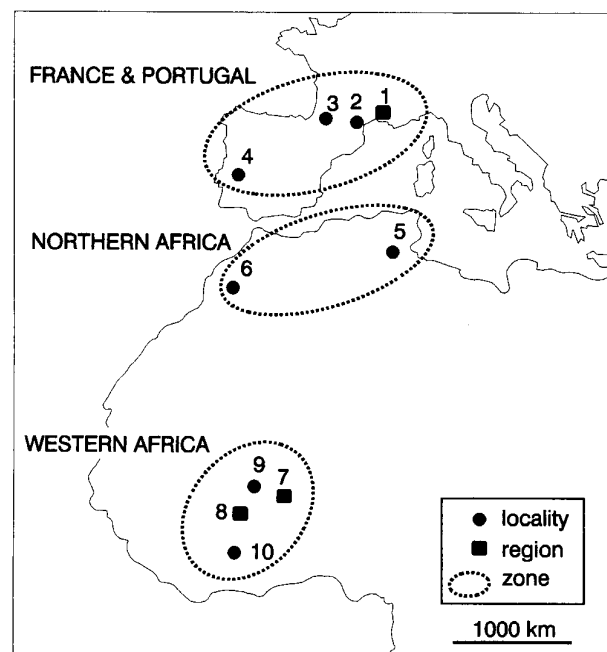


Figure 2 Etude de la structuration génétique des populations d'*H. armigera* : localisation des sites de collectes des 22 populations étudiées.

Ces résultats ont mis en évidence une absence totale de structuration des populations à l'échelle géographique étudiée. La première hypothèse explicative est que des flux migratoires se produisent entre populations à une très vaste échelle, y compris entre l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique du Nord. Des migrations de cette ampleur sont compatibles avec les capacités migratoires décrites chez *H. armigera* qui atteignent plusieurs milliers de kilomètres (Widmer et Schofield 1983). Une seconde explication de cette absence de structuration pourrait résider dans les limites de la méthodologie utilisée, et notamment la sous-estimation de la diversité génétique par la technique des isozymes (Fergusson 1980, Pasteur *et al.* 1987). Mais des travaux menés ultérieurement à partir de marqueurs RAPD (Zhou *et al.* 2000), puis microsatellites (Vassal *et al.* comm. pers.) ont également conclu à

l'absence de structuration des populations, malgré un échantillonnage géographique parfois plus étendu que le nôtre. De même, les travaux en cours au Cameroun, également basés sur des microsatellites (thèse J. Achaleke), ne mettent en évidence aucune structuration génétique au sein des populations d'*H. armigera*. En Australie, les travaux menés par Scott *et al.* (2006) ont dans un premier temps conclu à l'existence d'une structuration génétique des populations, avant d'être contredits par l'étude d'Endersby *et al.* (2007). La troisième explication pourrait résider dans une extension récente de l'aire de répartition de l'insecte, hypothèse avancée par exemple dans le cas de *Ceratitis capitata* (Wiedemann) en zone méditerranéenne (Gasperi *et al.* 1991).

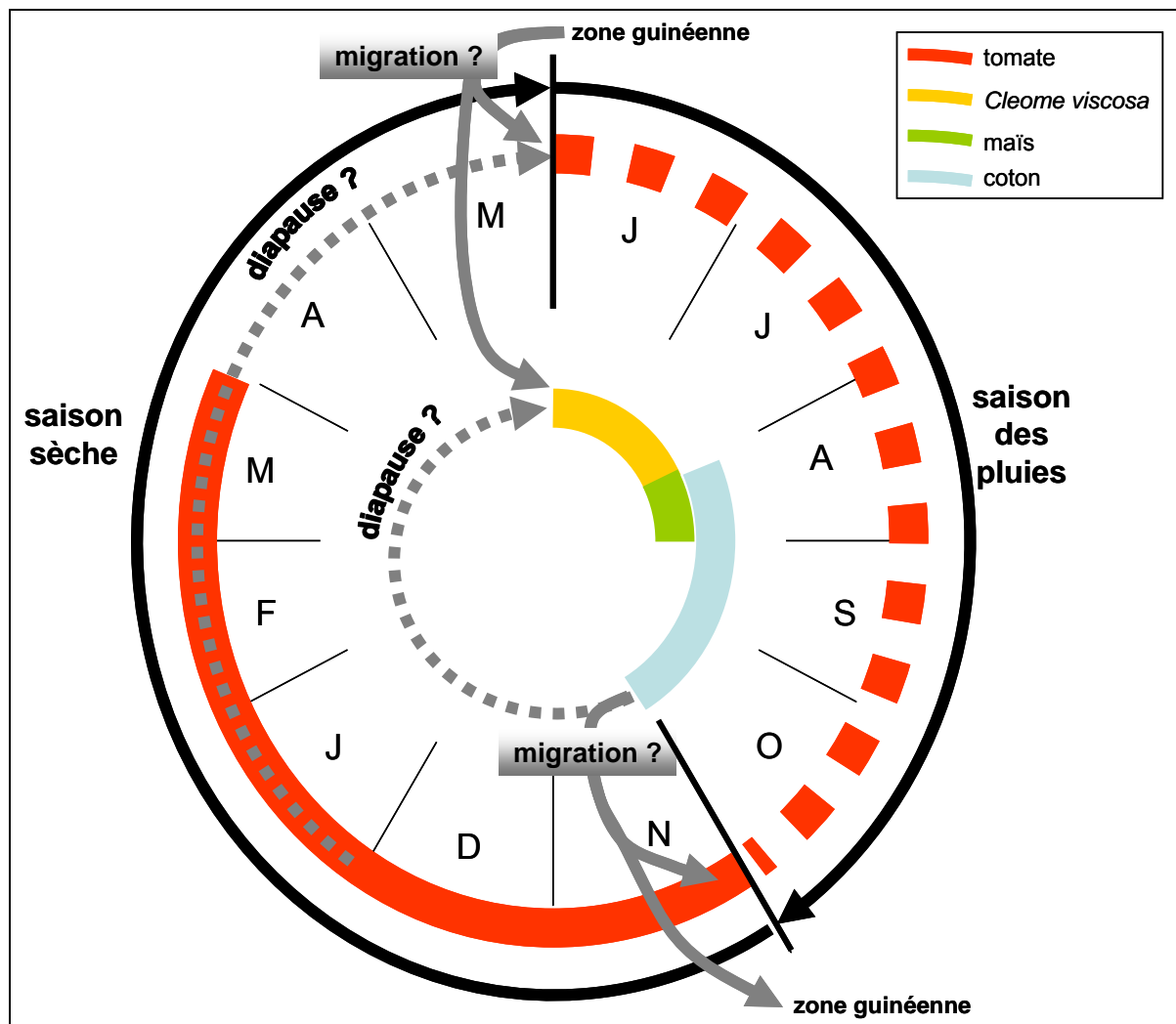


Figure 3 Ecologie d'*H. armigera* au Burkina Faso : succession des plantes-hôtes, diapauses et migrations.

L'ensemble des travaux menés sur la biologie et l'écologie d'*H. armigera* permet de proposer une schématisation du cycle annuel de l'insecte en zone climatique soudanienne (Figure 3). Dans ce schéma, l'insecte colonise alternativement des cultures pluviales et des cultures maraîchères en saison des pluies ou en saison sèche. Des populations résiduelles sont cependant susceptibles de se maintenir sur les cultures maraîchères durant la saison des pluies. Des migrations permettent à

H. armigera de coloniser alternativement les périmètres maraîchers et les zones de cultures pluviales. Ces migrations pourraient également permettre des échanges de populations avec des régions de la zone climatique guinéenne où le régime des pluies autoriserait une présence quasi continue de plantes hôtes. Plusieurs mécanismes de diapause pourraient également permettre la survie de populations résidentes durant la saison sèche. Si nos travaux ont mis en évidence la présence de phénomènes de diapause en conditions naturelles, ils n'ont en revanche pas permis de démontrer que ceux-ci pouvaient permettre à l'insecte de survivre à la saison sèche. L'importance relative des deux modes de contournement de la saison hostile, diapause vs. migration, reste à étudier.

Nibouche, S. 1998. High temperature induced diapause in the cotton bollworm *Helicoverpa armigera*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 87: 271-274.

Nibouche, S., Buès, R., Toubon, J.F., Poitout, S. 1998. Allozyme polymorphism in the American cotton bollworm *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae): comparison of African and European populations. *Heredity*, 80: 438-445.

Nibouche S. 1995. Cycle évolutif de *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera, Noctuidae) dans l'Ouest du Burkina Faso. pp 281-288 in: Ratnadass A. & Girardot B. (Eds.) Réunion de coordination phytosanitaire, cultures annuelles, Afrique de l'Ouest, Bamako, CIRAD-CA, IER, CORAF.

Nibouche, S. 1994. Cycle évolutif de *Helicoverpa armigera* (Hübner, 1808) (Lepidoptera, Noctuidae) dans l'Ouest du Burkina Faso : biologie, écologie et variabilité géographique des populations. Thèse de Doctorat, ENSA Montpellier, 143 p.

2.2.2. Modélisation de l'évolution de la résistance aux toxines de Bt

Le coton est une des principales cultures ayant recours à des cultivars transgéniques modifiés pour exprimer des toxines de la bactérie *Bacillus thuringiensis* afin de contrôler des larves de Lépidoptères. Le coton Bt est toxique pour les premiers stades larvaires d' *H. armigera* (Fitt *et al.* 1994, Xia *et al.* 1999, Kranthi *et al.* 2001). En Afrique de l'Ouest, la difficulté croissante à contrôler *H. armigera* du fait de sa résistance aux pyréthrinoïdes (Martin *et al.* 2000) va probablement conduire à une large adoption du coton Bt par les paysans dans un avenir proche, comme cela est déjà le cas dans la plupart des zones cotonnières de la planète.

De nombreux auteurs soulignent que certains lépidoptères ravageurs du cotonnier risquent de devenir très rapidement résistants aux toxines de Bt si aucune stratégie de prévention n'est mise en œuvre (Gould 1998). La modélisation – basée sur les connaissances acquises sur l'héritabilité de la résistance et sur le rôle des plantes hôtes cultivées ou spontanées dans la dynamique des populations des insectes – est un outil qui a été utilisé pour mettre au point des stratégies de prévention dans divers environnements (Caprio 1994, Gould 1998, Ru *et al.* 2002, Vacher *et al.* 2003). Aux USA, la stratégie « high dose - refuge » (HDR) consiste à associer un fort niveau d'expression de la toxine de Bt par les plantes avec la présence de zones refuges cultivées avec des cotonniers conventionnels (Gould 1998). Cette stratégie est actuellement renforcée par une stratégie de pyramidage, qui consiste à associer une seconde toxine (Cry2Ab) à la première (Cry1Ac).

La mise en place de refuges en cotonniers conventionnels représente un certain nombre de contraintes pratiques et financière. Aux USA (Abney *et al.* 2003, Jackson *et al.* 2003), en Inde (Sundaramurthy et Gahukar 1998), en Chine (Wu *et al.* 2002) et en Afrique du Sud (Green *et al.* 2003), un nombre croissant de travaux tendent à conclure que les cultures-hôtes alternatives et la végétation spontanées sont suffisantes pour servir de refuges naturels, rendant inutile la mise en place de refuges en cotonniers non Bt.

Utilisant une démarche de modélisation, nous avons cherché à définir la stratégie de prévention de la résistance la mieux adaptée à la libération de cotonniers Bt pyramidés dans les systèmes de culture d'Afrique subsaharienne. Une des questions centrales était notamment d'étudier si la mise en place de zones refuges était nécessaire ou si la présence de plantes-hôtes alternatives rendait cette mesure inutile. Notre approche s'est basée sur les connaissances acquises sur l'écologie d'*H. armigera* au Burkina Faso (Figure 3). En l'absence de démonstration expérimentale du rôle de la diapause dans la survie du ravageur durant la saison sèche, ce mécanisme de survie n'a pas été intégré au modèle.

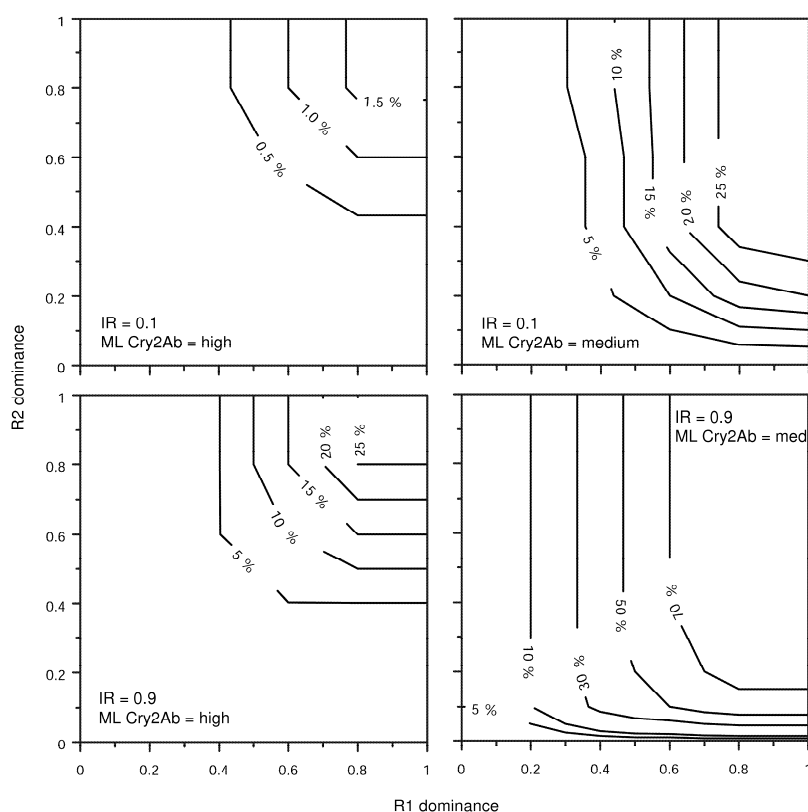


Figure 4 Simulation du pourcentage minimal de surface à maintenir en refuges de cotonniers conventionnels pour éviter une résistance d'*H. armigera* aux toxines de Bt Cry1Ac et Cry2Ab en moins de 20 ans. R1 et R2 sont les dominances des gènes de résistance à Cry1Ac et Cry2Ab, ML Cry2Ab est le taux de mortalité induit par la toxine Cry2Ab, IR est le taux d'immigration du coton vers la tomate en début de saison sèche (novembre).

Dans les conditions agroécologiques de l'Afrique de l'Ouest, nos simulations ont montré que l'absence de plantes-hôtes alternatives au coton durant au moins deux générations rendait indispensable la mise en place de zones refuges cultivées en cotonniers non transgéniques et que le recours à des refuges naturels était insuffisant. Pour servir de refuges naturels et permettre la dilution des gènes de résistance, des plantes-hôtes alternatives doivent héberger des populations d'*H. armigera* (i) importantes et (ii) de manière synchrone avec les infestations se développant sur cotonnier. Aucune des plantes-hôtes alternatives au coton dans les agroécosystèmes pluviaux ne remplit simultanément ces deux conditions. Les cultures maraîchères, et principalement la tomate, pourraient remplir ce rôle de refuge naturel, mais leur efficacité dépend de l'intensité des flux de gènes entre agroécosystèmes pluviaux et irrigués.

Les simulations réalisées (Figure 4) ont montré que la taille optimale des refuges en cotonniers conventionnels dépendait principalement de deux paramètres, (i) le taux de mortalité induit par les cotonniers Bt, et (ii) l'intensité des flux de gènes entre cultures pluviales et cultures maraîchères. Le pire scénario en terme de rapidité d'apparition de la résistance serait de combiner (i) deux gènes de résistance dominants, (ii) un niveau d'expression insuffisant des toxines, et (iii) de forts flux migratoires entre zones cotonnières et zones maraîchères. Dans un tel scénario, nos simulations montrent que les refuges à mettre en place devraient couvrir 78% de la surface cultivée en coton pour permettre une durabilité acceptable de la technologie.

De telles conclusions remettent en question l'intérêt du cotonnier Bt dans les conditions agroécologiques de l'Afrique subsaharienne, mais elles reposent sur des hypothèses concernant les valeurs de certains paramètres clefs du modèle. Parmi ces paramètres, le taux d'immigration *IR* (% d'adultes originaires du coton au sein des adultes parents des populations présentes sur la tomate en début de saison sèche) influe fortement sur les résultats des simulations. L'estimation indirecte des flux de gènes par les méthodes classiques de génétique des populations ne permet pas d'estimer ce paramètre. En revanche, l'utilisation de marqueurs non génomiques tels que les rapports isotopiques (Gould *et al.* 2002) ou le dosage du gossypol (Orth *et al.* 2007) permet cette estimation en déterminant directement la plante hôte d'origine de papillons capturés par piégeage phéromonal. Ces travaux sont actuellement en cours au Cameroun (thèse J. Achaleke) et permettront d'affiner les simulations du modèle. D'autre part, la démonstration récente de la possibilité pour des chrysalides diapausantes d'*H. armigera* de survivre à la saison sèche (thèse J. Achaleke) va nécessiter des modifications du modèle pour pouvoir y intégrer les phénomènes de diapause.

Nibouche, S., Guérard, N., Martin, P., Vaissayre, M. 2007. Modelling the role of refuges for sustainable management of dual-gene Bt Cotton in West African smallholder farming systems. *Crop Protection*, 26: 828-836.

Vaissayre, M., Martin, P., Nibouche, S. 2006. Key factors for Bt cotton sustainability in smallholder farming: a modelling approach. *Bulletin IOBC/WPRS*, 29: 193-196.

Nibouche, S., Martin, P., Vaissayre, M. 2003. A modelling approach of the sustainability of Bt cotton grown by small farmers in West Africa. *Resistant Pest Management Newsletter*, 13: 55-58.

2.3. Seuils d'intervention contre les chenilles de la capsule du cotonnier

En Afrique sub-saharienne les chenilles des capsules sont parmi les arthropodes les plus nuisibles à la culture cotonnière. Leur contrôle repose à l'heure actuelle essentiellement sur la lutte chimique. L'objectif de réduction de la dépendance de la culture cotonnière aux pesticides impose d'évoluer vers la protection intégrée (IPM).

Quelques soient les multiples approches et évolutions du concept d'IPM (Kogan 1998, Ehler 2006, Deguine *et al.* 2008), la plupart s'appuient sur la notion de maintien des populations de ravageurs à des niveaux inférieurs à ceux causant des dégâts économiques, c'est-à-dire sur le concept de seuil de dégât économique élaboré par Stern *et al.* (1959).

Cette stratégie de protection sur seuils fait intervenir un certain nombre de concepts et de définitions (Stern *et al.* 1959, Pedigo *et al.* 1986). Les insectes ravageurs causent aux cultures des dégâts biologiques (*injury*), dus notamment au prélèvement de biomasse pour leur alimentation. Ces dégâts peuvent occasionner des pertes (*damage*), qui sont une réduction de la valeur économique de la culture. Le *dégât économique* (*economic damage*) correspond à une perte de valeur économique égalant le coût de la mesure de contrôle qui permettrait de l'éviter. Le *seuil de dégât économique* (*economic injury level, EIL*) est la densité de la population d'insectes nécessaire pour causer un dégât économique. Le *seuil économique* (*economic threshold*) est une notion plus floue (Pedigo *et al.* 1986) qui vise à tenir compte du caractère préventif de l'intervention (intervenir avant que la population de ravageur ne produise le dégât économique). La notion de *seuil d'intervention* (*action threshold*) fait l'objet de définitions variées suivant les auteurs (Pedigo *et al.* 1986). Dans ce qui suit, nous emploierons ce terme de seuil d'intervention pour désigner le critère de décision (ici le nombre de chenilles par plant) calculé à partir de l'EIL en fonction du plan d'échantillonnage utilisé sur le terrain.

Dans la pratique, l'utilisation de seuils implique de pouvoir répondre à deux questions:

- quelle est la valeur de l'EIL ?
- l'effectif de la population de ravageurs est-elle supérieure à l'EIL ?

La première question relève d'une problématique d'interactions plante-ravageur et de réponse de la culture aux dégâts et la seconde relève d'une problématique d'échantillonnage.

Dans le contexte spécifique de l'Afrique subsaharienne, caractérisé par un encadrement agricole doté de moyens restreints, il se pose également une troisième question qui est celle de la faisabilité et des modalités de la diffusion de techniques d'échantillonnage et de traitement sur seuil auprès de petits paysans ayant un accès limité à l'information écrite.

Les recherches menées sur la problématique de l'échantillonnage ont en partie été conduites dans le cadre du PhD de Jacques Beyo de 2000 à 2002, et du travail de Coopérant du Service National de Régis Babin en 1999-2000.

2.3.1. Vulgarisation de seuils d'intervention en Afrique subsaharienne

Dans les années 90, des expérimentations ont été menées dans plusieurs pays d'Afrique subsaharienne pour mettre au point et tester la Lutte étagée Ciblée (LEC), programme de protection du cotonnier partiellement basé sur l'utilisation de traitements sur seuils (Silvie *et al.* 2001). La LEC repose sur la combinaison de deux niveaux de protection : un premier niveau où des doses réduites d'insecticide sont appliquées systématiquement, un second niveau où des traitements sont réalisés sur seuils. L'objectif des travaux que nous avons menés au Burkina Faso étaient (i) d'une part d'évaluer les performances techniques et économiques de la LEC, et d'autre part (ii) d'évaluer la faisabilité de la diffusion d'une stratégie de protection basée sur des seuils dans le contexte du petit paysannat d'Afrique subsaharienne.

Dans un premier temps, des expérimentations menées en milieu contrôlé ont permis de vérifier que la protection permise par la LEC était équivalente à celle d'un programme de protection calendaire classique. Dans un deuxième temps, nous avons testé les performances et les modalités de vulgarisation de la LEC en milieu paysan. Ce travail a été réalisé en collaboration avec une équipe de chercheurs en sciences humaines et sociales travaillant sur la mise au point de méthodes de conseil et d'aide à la décision pour les petits producteurs (Faure et Kleene 2004). Cette collaboration a permis la mise au point d'outils permettant une appropriation de techniques d'échantillonnage par des agriculteurs souvent peu ou pas lettrés. Parmi ces outils, nous avons notamment pu tester avec succès l'utilisation de planchettes de comptage (Figure 5) pour réaliser les opérations d'échantillonnage de ravageurs. Sur les deux années d'expérimentation, les performances de la LEC se sont avérées satisfaisantes, puisque des réductions de 44 à 54% des quantités d'insecticides utilisées ont été obtenues sans occasionner de pertes de rendements.

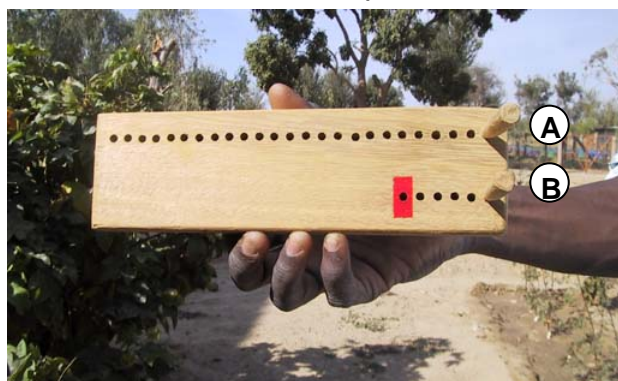


Figure 5 Planchette pour plan d'échantillonnage à taille fixe inspirée de Beeden (1972). En haut (A) 25 trous correspondant aux 25 cotonniers observés, en bas (B) les trous correspondant au nombre de chenilles observées (le seuil d'intervention est ici fixé à 6 chenilles / 25 plants).

Ces travaux ont permis de démontrer la faisabilité et la pertinence d'une stratégie de protection sur seuil dans un contexte de petit paysannat faiblement encadré. La LEC n'a pas été diffusée ultérieurement au Burkina Faso, mais elle a été vulgarisée à grande échelle au Mali (Michel *et al.* 2000) sous une forme très proche de celle testée au Burkina Faso, basée sur l'utilisation de planchettes de comptage.

Silvie, P., J.P. Deguine, S. Nibouche, B. Michel and M. Vaissayre 2001. Potential of threshold-based interventions for cotton pest control by small farmers in West Africa. *Crop Protection*, 20: 297-301.

Nibouche, S., Faure, G., Kleene, P. & Ouedraogo, S. 1998. First step toward integrated pest management on cotton in Burkina Faso. *Crop Protection*, 17: 697-701.

2.3.2. Echantillonnage

La mise au point d'un plan d'échantillonnage repose (i) sur la définition d'un protocole de prise d'échantillon dans la parcelle, et (ii) sur la connaissance de la loi statistique du nombre d'insectes par unité d'observation.

2.3.2.1. Distribution spatiale intra parcelle

La théorie classique de l'échantillonnage repose sur un choix aléatoire des unités à observer qui permet de remplir la condition d'indépendance entre les unités d'observation. En pratique, le choix aléatoire prend du temps et est souvent remplacé par le choix au gré de l'observateur, ce qui introduit des biais dus à une sélection plus ou moins inconsciente des plants observés (Titmarsh *et al.* 1991, Binns *et al.* 2000). L'échantillonnage systématique ou semi-systématique (procédure de choix des plants à observer préétablie) évite ce biais en rendant le choix des unités d'observation indépendant de l'observateur. Mais la validité de ce type d'échantillonnage ne peut être évaluée sans une connaissance de la distribution spatiale des insectes dans la parcelle.

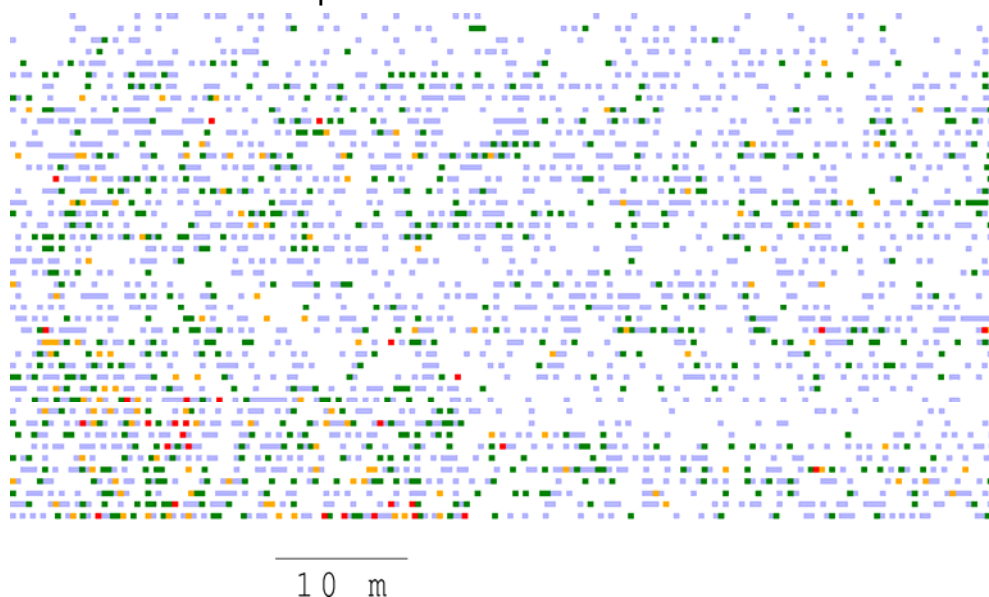


Figure 6 Exemple d'une carte d'infestation d'une parcelle de 0,25 ha : chaque poquet (deux plants) infesté est représenté par un carré dont la couleur correspond au nombre de chenilles d'*H. armigera* hébergées (bleu : 1 chenille, vert : 2 chenilles, orange : 3 chenilles, rouge : 4 chenilles ou plus).

Nous avons mené des travaux au Burkina Faso consistant à relever la position de toutes les chenilles d'*H. armigera* présentes dans dix parcelles de cotonniers de 0.25 ha (Figure 6). L'indépendance du nombre de chenilles hébergées par des plants voisins a été évaluée par des variogrammes (Figure 7). Aucune corrélation entre plants voisins n'a pu être mise en évidence, quelle que soit la distance ou la direction considérée. Cette indépendance spatiale des niveaux d'infestation entre plants

voisins est d'un intérêt pratique certain, puisque qu'elle valide *a posteriori* la pratique courante de l'échantillonnage systématique, par exemple selon les diagonales de la parcelle.

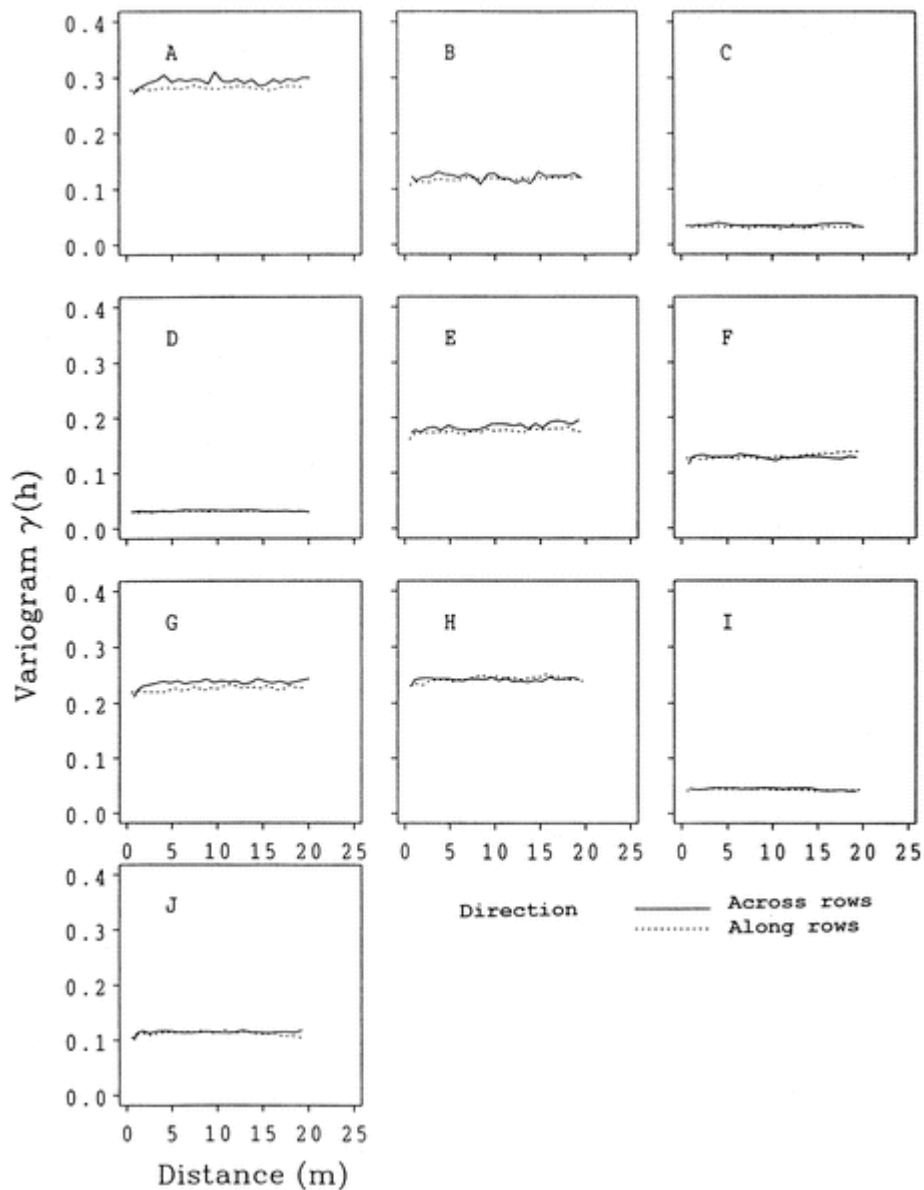


Figure 7 Variogrammes le long des lignes de cotonniers ou perpendiculairement aux lignes, sur des dix parcelles (A à J) ayant subi un échantillonnage exhaustif.

2.3.2.2. Loi statistique et échantillonnage

La mise au point d'un plan d'échantillonnage à taille fixe s'appuie sur la détermination du seuil d'intervention, qui est fonction de l'EIL, de la taille de l'échantillon et des risques choisis. Cette détermination du seuil d'intervention repose sur la loi de probabilité du nombre total d'insectes comptés. Classiquement pour des données de comptage d'insectes, la loi de probabilité n'est pas connue. Mais lorsque l'échantillon croît en taille cette loi converge vers une loi normale dont la variance est fonction de la moyenne (Taylor 1984). La méthode la plus couramment usitée pour construire un test (Binns *et al.* 2000) consiste à déterminer les paramètres de la

relation empirique entre moyenne et variance (en utilisant la Taylor Power Law ou la relation moyenne-variance d'Iwao) et d'utiliser cette relation pour calculer le seuil d'intervention à partir d'une approximation normale de l'intervalle de confiance de la moyenne d'un comptage. Cependant, le recours à l'approximation normale nécessite que le produit entre l'EIL et la taille de l'échantillon dépasse 18 pour une approximation grossière de la loi de Poisson (Saporta 2006), tandis que pour les autres lois discrètes plus agrégatives l'approximation est de plus mauvaise qualité. Dans notre travail, nous avons considéré que la faible taille des échantillons (en général 25 plants) et le faible niveau de l'EIL (0,1 à 0,3 chenilles par plant) ne nous permettaient pas d'utiliser l'approximation normale. Nous avons par conséquent cherché à déterminer la loi statistique du nombre de chenilles par plant. Généralement, la détermination de cette loi se fait sur la base de la relation observée entre moyenne et variance. Dans le cas des chenilles de la capsule du cotonnier, comme dans le cas de nombreux insectes ravageurs, la loi binomiale négative (LBN) a été utilisée par de nombreux auteurs. Après avoir vérifié la conformité de la relation moyenne-variance entre la LBN et les observations et déterminé la valeur de son paramètre d'agrégation k par maximum de vraisemblance, nous avons utilisé la distribution exacte de la LBN pour déterminer les seuils d'intervention.

La connaissance de la loi de distribution du nombre de chenilles par plant nous a également permis de calculer un plan d'échantillonnage séquentiel (Wald 1947), adapté au cas de la distribution binomiale négative par Oakland (1950). Par simulations à partir de la loi de distribution, les performances du plan séquentiel peuvent être évaluées au travers (i) de la fréquence des décisions erronées en fonction de l'infestation moyenne (courbe OC, *operating characteristic function*) et (ii) du nombre moyen d'observations à réaliser avant la prise de décision (courbe ASN, *average sample number*).

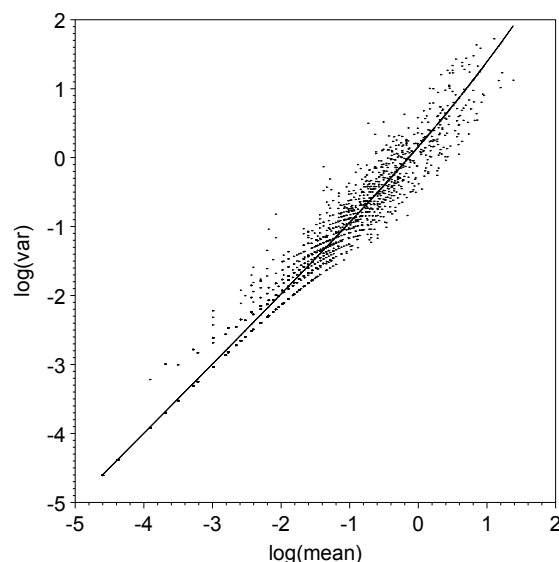


Figure 8 Relation moyenne-variance du nombre de chenilles de la capsule par cotonnier (toutes espèces confondues) sur 2083 parcelles non traitées au Nord Cameroun. Chaque point représente un sondage sur 80 ou 100 plants.

En Afrique subsaharienne, les chenilles de la capsule comptent trois espèces ou genres appartenant à la famille des Noctuidae : *Helicoverpa armigera*, *Diparopsis watersi* (Rothschild) et *Earias* spp. Ces ravageurs ont la même aire de répartition, ont une forte incidence économique et sont souvent présents simultanément dans les parcelles de cotonniers. Pour des raisons pratiques, une stratégie de contrôle sur seuil nécessite la mise au point d'un plan d'échantillonnage prenant en compte simultanément les trois espèces, afin d'éviter d'alourdir la procédure.

Les données utilisées pour cette étude consistaient en 2083 comptages de chenilles réalisés sur 80 ou 100 plants sur des parcelles non traitées, dans le cadre d'une surveillance des populations de ravageurs menée par la société cotonnière du Cameroun (Sodécoton) de 1989 à 1994. L'analyse de la relation moyenne-variance pour ces 2083 comptages (Figure 8) pour chacune des trois espèces a montré que le nombre de chenilles par plant suivait classiquement une loi binomiale négative, et que le coefficient d'agrégation de la LBN était différent pour chacune des espèces. Néanmoins, nous avons pu démontrer que la loi du nombre total de chenilles des trois espèces par plant pouvait être approximée par une LBN ayant un coefficient d'agrégation commun. De plus, nous avons pu montrer théoriquement que des fluctuations de cette distribution, résultant de fluctuations d'abondance relative des trois espèces, n'avait pas une amplitude suffisante pour avoir un effet sur la définition de plans d'échantillonnage fixe ou séquentiel. Ces résultats nous ont permis de définir des plans d'échantillonnage fixe ou séquentiel, permettant de contrôler les risques d'erreur de première espèce (intervenir à tort) et de seconde espèce (s'abstenir à tort d'intervenir) à un niveau prédéterminé.

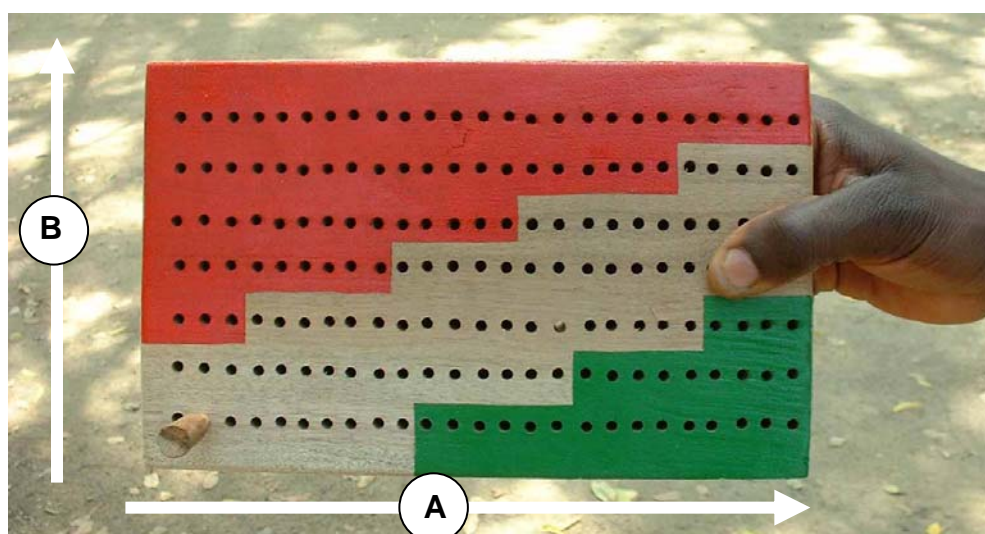


Figure 9 Planchette pour échantillonnage séquentiel. La cheville est déplacée dans le sens de la longueur (A) pour chaque plant observé et dans le sens de la largeur (B) pour chaque chenille observée. En vert la zone de non traitement, en rouge la zone de traitement, sans couleur la zone d'indécision.

Un prototype de planchette de comptage (Figure 9) a été mis au point durant ces travaux afin de permettre l'adoption de l'échantillonnage séquentiel par des paysans peu ou pas lettrés. Cette planchette d'échantillonnage séquentiel a été testée par la suite avec succès au Cameroun (Brévault *et al.* submitted).

Les résultats obtenus sont une base qui permet le développement de tous types de plans d'échantillonnage. Des travaux sont par exemple actuellement en cours au Mali (Renou comm. pers.) pour développer un plan d'échantillonnage de type présence-absence basé sur l'observation d'au moins une chenille sur un nombre de plants prédéterminé.

2.3.2.3. Distribution intra plant et échantillonnage

L'échantillonnage des chenilles de la capsule du cotonnier est basé sur l'examen de la totalité de la plante. Le caractère fastidieux de cette opération est un des freins à l'adoption de programmes de protection basés sur des seuils. Une voie de réduction du temps passé à l'échantillonnage est celle que nous avons exposée au paragraphe précédent et consiste à réduire le nombre de plantes observées, en utilisant par exemple un plan d'échantillonnage séquentiel. Une autre voie consiste à n'observer qu'une partie de la plante au lieu de la totalité (Wilson 1982). En effet, les chenilles des capsules sont connues pour leur tendance à être localisées plutôt en haut de plant (Fye 1972, Ramalho *et al.* 1984). L'échantillonnage des chenilles pourrait ainsi reposer sur l'examen de la seule partie terminale des plants. Cependant, la mise en œuvre d'un tel échantillonnage suppose que la proportion de chenilles localisées en haut de plant soit constante. Nous nous sommes par conséquent intéressés à décrire la localisation des chenilles des capsules sur les plants de cotonniers et à exploiter la connaissance de cette localisation pour définir une procédure d'échantillonnage accélérée.

Les travaux menés au Cameroun ont consisté à cartographier la position des chenilles (numéro de branche fructifère, position sur la branche) sur les plants de parcelles traitées ou non traitées, en conditions d'infestation naturelle. Quatre genres ou espèces ont été pris en compte : *Helicoverpa armigera*, *Diparopsis watersi*, *Spodoptera littoralis* (Boisduval), et *Earias* spp.

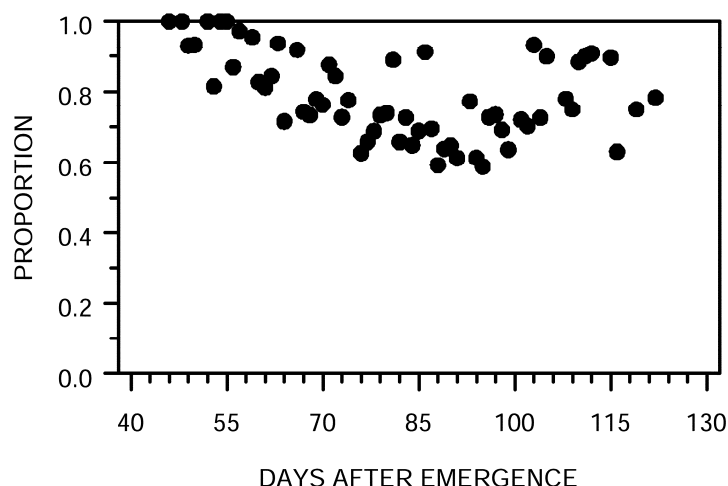


Figure 10 Relation entre la date d'observation (jours après levée de la culture) et la proportion de chenilles localisées sur les dix branches fructifères supérieures des plants.

Les résultats ont montré que la proportion de chenilles présentes sur les cinq branches fructifères terminales était trop variable dans le temps pour permettre de développer un plan d'échantillonnage. L'observation des dix branches terminales a fourni des résultats plus stables, mais il s'est avéré que la proportion de chenilles observées variait significativement suivant l'âge de la plante (Figure 10) et suivant l'espèce de ravageur.

Nous avons contourné cette difficulté en considérant que la proportion de chenilles portées par les dix branches supérieures était fixe et égale à la valeur minimale observée (soit 59%). Cette sous-estimation a abouti à un plan d'échantillonnage conservatif qui surestime les populations de chenilles présentes. Selon ce principe, le nombre de chenilles portées par les dix branches supérieures de n plants suit un mélange infini de lois binomiales de paramètres n et 0.59, le paramètre n suivant une loi binomiale négative dont le paramètre d'agrégation k a été déterminé lors des travaux exposés précédemment. Ce plan d'échantillonnage permet une réduction du temps d'échantillonnage allant jusqu'à 60%. Mais cette réduction se fait au prix d'un accroissement du risque de première espèce, c'est à dire une augmentation de la fréquence des décisions d'intervention prises à tort.

Brévault, T., Couston, L., Bertrand, A., Thézé, M., Nibouche, S., Vaissayre M. *submitted*. Sequential pegboard to support small farmers in cotton pest control decision making. Crop Protection.

Nibouche, S., Babin, R., Beyo, J., Gozé, E. 2004. Within Plant Distribution of Cotton Boll-infesting Lepidoptera. Application to Sampling. Environmental Entomology, 33: 1458-1464.

Beyo, J., Nibouche, S., Gozé, E., Deguine, J.P. 2004. Application of Probability Distribution to the Sampling of Cotton Bollworms (Lepidoptera: Noctuidae) in Northern Cameroon. Crop Protection, 23: 1111-1117.

Gozé, E., Nibouche, S., Deguine, J.P. 2003. Spatial and Probability Distribution of *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera, Noctuidae) in Cotton. Systematic Sampling, Exact Confidence Intervals and Sequential Test. Environmental Entomology, 32: 1203-1210.

Beyo J., Nibouche S., Babin R., Gozé E. 1999. Echantillonnage intra-plant des chenilles carpophages du cotonnier. In : Cinquième conférence internationale sur les ravageurs en agriculture. Paris : ANPP, p. 881-896. Conférence internationale sur les ravageurs en agriculture. 5, 1999-12-07/1999-12-09, Montpellier, France.

Gozé, E., S. Nibouche and J.P. Deguine. 1998. Bollworm sampling to determine action thresholds in sub-Saharan Africa: Spatial and probability distribution. pp 883-884 in Gillham, F. (Ed.) New Frontiers in Cotton Research: Proc. World Cotton Research Conference II. WCRC-2 Organizing and Scientific Committees, Athens.

2.3.3. Evaluation des seuils de dégât économique

Le développement de programmes de protection basés sur des seuils d'intervention contre les chenilles de la capsule du cotonnier a été entrepris la plupart du temps à partir de seuils d'intervention empiriques, car la définition de seuils de dégât économique en culture cotonnière est complexe. En effet, le cotonnier est une plante à croissance indéterminée qui possède une aptitude à compenser les pertes d'organes fructifères dues aux stress biotiques ou abiotiques. Suivant le stade phénologique de la plante et les conditions de culture, la destruction d'un nombre

donné de sites fructifères peut se traduire par des pertes de rendement variables, voire par des gains de rendement en cas de surcompensation (Brook *et al.* 1992, Sadras 1996, Stewart *et al.* 2001, Lei et Gaff 2003).

Les questions auxquelles nous nous sommes intéressés étaient :

- de déterminer si la variabilité des conditions de culture rencontrées en Afrique subsaharienne induisait une variabilité des seuils suffisamment importante pour devoir être prise en compte dans la définition de stratégies de protection,
- dans l'affirmative, de mettre au point des règles de décision permettant de moduler les seuils en fonction des conditions agronomiques ou de l'état de développement de la culture.

Pour mener ces travaux, nous avons choisi d'adopter la démarche de modélisation des interactions entre culture et ravageurs (Teng *et al.* 1998) déjà utilisée chez le riz (Willoquet *et al.* 2004) et le blé (Willoquet *et al.* 2008). Cette approche permet d'envisager d'appréhender une variabilité environnementale trop importante pour être prise en compte uniquement par une démarche expérimentale classique de terrain. Le modèle plante qui a servi de base à nos travaux était le modèle GOSSYM développé aux USA (Baker *et al.* 1983) et qu'une équipe du CIRAD travaillait à adapter aux conditions agroécologiques d'Afrique subsaharienne (Jallas *et al.* 1999).

Les travaux présentés ici portent sur la mise au point du modèle COBOLD (COton BOLworm Damages), ex-SIMBAD. Le modèle, couplé à GOSSYM, simule les pertes de production occasionnées par les chenilles de la capsule. Le principe de fonctionnement de COBOLD consistait à simuler le nombre, le type et la position des organes fructifères détruits par une population de chenilles observée, en fonction de la disponibilité en organes simulée par GOSSYM.

2.3.3.1. Modélisation des dégâts des chenilles de la capsule

Le développement du modèle COBOLD a nécessité en premier lieu l'acquisition de données biologiques sur le comportement alimentaire des chenilles de la capsule. Nous nous sommes principalement intéressés au comportement alimentaire d'*H. armigera*, mais des données ont également été acquises sur les trois autres espèces de chenilles de la capsule. L'approche choisie a consisté à décomposer le comportement alimentaire en deux composantes : la voracité (quantité de biomasse et nombre d'organes consommés) et les préférences alimentaires (type d'organes consommés).

La voracité d'*H. armigera* a été étudiée en laboratoire en alimentant les chenilles avec des organes excisés. Les résultats ont permis de déterminer la quantité de biomasse ingérée par une chenille durant sa vie larvaire, 86% de cette biomasse étant consommée par le dernier stade. Cette quantité de biomasse correspond à une moyenne de 24 boutons floraux ou huit capsules, mais ces valeurs dépendent de la taille des organes considérés. Afin de pouvoir passer d'une quantité de biomasse à des nombres d'organes, nous avons développé des relations linéaires prédisant le prélèvement de biomasse par organe individuel en fonction du stade larvaire et de la masse initiale de l'organe.

Les préférences alimentaires d'*H. armigera* ont été étudiées au champ en conditions d'infestation naturelle. Les résultats ont confirmé que les chenilles

préféraient les boutons floraux aux capsules. En revanche, nos résultats n'ont pas permis d'observer une relation entre âge des chenilles et taille des organes attaqués, alors que cette relation était souvent considérée comme évidente. Les observations réalisées nous ont permis de développer un modèle logistique pour prédire la probabilité pour une chenille d'infester une capsule plutôt qu'un bouton floral, en fonction de l'âge de la chenille et de l'abondance relative des boutons et des capsules dans la parcelle.

2.3.3.2. Modélisation des pertes de rendement

Le modèle COBOLD est constitué de deux modules, le premier simulant la dynamique des populations de chenilles des capsules (nombre par stade larvaire), et le second simulant le nombre et le type d'organes attaqués par les chenilles. Le module de dynamique des populations, paramétré d'après des données de la littérature, utilise comme données d'entrée la température, l'effectif de chenilles observées, la mortalité naturelle et la dynamique des éclosions de chenilles. Le module de dégât est basé sur les résultats présentés au paragraphe précédent.

Le modèle GOSSYM simule le fonctionnement d'une parcelle de cotonniers par une plante moyenne considérée comme représentative du peuplement. Sur un pas de temps quotidien, le modèle simule l'architecture de la plante et calcule pour chaque site fructifère la masse et le taux de présence du fruit.

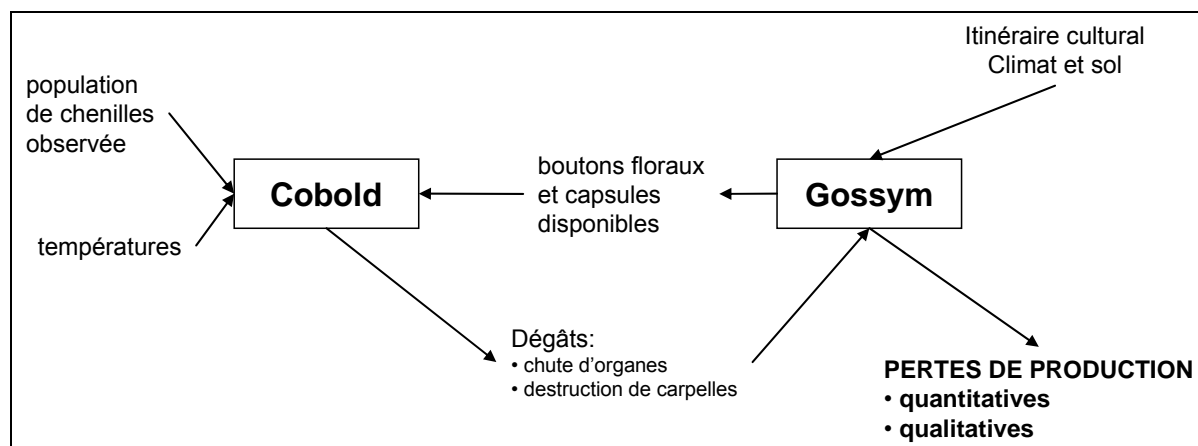


Figure 11 Architecture du couplage des modèles GOSSYM et COBOLD : variables d'entrée et variables de sortie.

Le couplage de GOSSYM avec COBOLD (Figure 11) a consisté (i) en la mise en relation de la demande alimentaire de COBOLD avec la disponibilité alimentaire proposée par GOSSYM et (ii) en la gestion de l'interaction. Fonctionnant à des niveaux d'organisation différents, à savoir culture pour GOSSYM et fruit pour COBOLD, une fonction de changement d'échelle a été introduite dans l'interface de liaison des modèles. L'interface assure également la synchronisation temporelle des modèles, i.e. journalier pour GOSSYM et horaire pour COBOLD. Ce couplage a nécessité le développement de solutions informatiques originales sur lesquelles porte une partie de la thèse de Pierre Martin (en cours). La validation de COBOLD reste à achever, étape préalable à l'utilisation du modèle pour traiter la question de la variabilité des seuils de dégât économique induite par la variabilité des conditions agronomiques.



Figure 12 Illustration graphique d'une simulation par les modèles GOSSYM-COBOLD de l'effet d'une attaque de chenilles sur l'architecture des plants : plante saine à droite et plante attaquée à gauche. Seules les positions fructifères ayant un taux de capsules présentes de plus de 33% sont représentées.

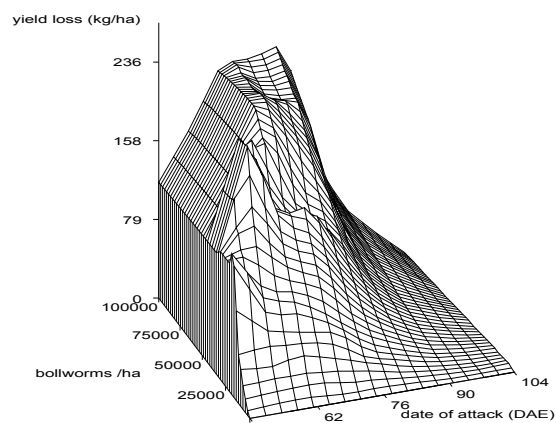


Figure 13 Illustration des pertes de rendements simulées par les modèles GOSSYM-COBOLD avec différents niveaux de populations de chenilles (nombre de larves / ha) en fonction de l'âge de la culture lors de l'attaque (jours après levée).

Martin P., Nibouche S., Clouvel P. 2008. Simulation of bollworm damages on cotton. In: Rydahl P. (ed.) ENDURE, Workshop on DSS for Crop Protection, 17-19 March, 2008, Flakkebjerg, Denmark.

Nibouche, S., Gozé, E., Babin, R., Beyo, J., Brévault T. 2007. Modeling *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) damages on cotton. *Environmental Entomology*, 36:151-156.

Nibouche, S., Martin, P., Crétenet, M., Jallas, E., Turner, S. 2003. COTONSIMBAD system: modeling feeding behavior of cotton bollworms for evaluation of crop pest interactions. In: *Proceedings of the Beltwide Cotton Conferences 2003*. - Nashville: NCCA.

Nibouche, S., Beyo, J., Brévault, T., Crétenet, M., Gozé, E., Jallas, E., Martin, P., Moussa, A. A. 2003. Cotton bollworm economic injury levels based on crop model predictions: another use of the COTONS model. In: *Proceedings of the third World Cotton Research Conference*, Cape Town, South Africa, 2003 march 9-13.

Nibouche, S., Beyo, J., Brévault, T., Crétenet, M., Gozé, E., Jallas, E., Martin, P., Moussa, A. A. 2002. Cotons®-Simbad: a tool for establishing Cotton Bollworm economic damage thresholds. pp 307-308 in Villalobos, F. J., Testi, L. (eds) VII Congress of the European Society for Agronomy, Cordoba, 15-18 July 2002. Junta de Analucia, Sevilla.

Jallas E., Crétenet M., Martin P., Turner S., Nibouche S. 2002. CotonSimbad. Release 1.0. Cédérom. Montpellier: Irad, Prasac, Cirad.

2.4. Résistance des plantes aux insectes phytophages

2.4.1. Résistance du cotonnier aux pucerons et aux Typhlocybinae

Le puceron du cotonnier *Aphis gossypii* Glover (Homoptera: Aphididae) et les « jassides » (Homoptera: Cicadellidae, Typhlocybinae) sont d'importants ravageurs du cotonnier en Afrique subsaharienne. Ils sont responsables de dégâts directs (prélèvements de sève, toxémiasés) et de dégâts indirects (pollution de la fibre par les miellats dans le cas des pucerons). La pilosité des feuilles de cotonnier est un caractère morphologique de résistance aux jassides connu depuis longtemps (Parnell *et al.* 1949). Le caractère pileux est systématiquement utilisé en sélection en Afrique (Vaissayre *et al.* 1995) et est également utilisé en Asie (Agarwal *et al.* 1978). La résistance aux pucerons est moins bien documentée que la résistance aux jassides, mais plusieurs auteurs considèrent la pilosité comme un caractère de sensibilité aux pucerons (Harris *et al.* 1994, Weathersbee et Hardee 1994, Zarpas *et al.* 2006).

L'étude que nous avons menée avait pour objectifs (i) d'explorer la variabilité de la sensibilité du germplasm du cotonnier à ces deux ravageurs, (ii) de tester l'existence de corrélations entre la résistance aux pucerons et aux jassides, et (iii) d'améliorer la méthodologie d'évaluation de la sensibilité. L'étude a été menée au Cameroun en conditions d'infestation naturelle, de 2000 à 2005, sur 71 accessions issues de la collection de germplasm du CIRAD. Le séjour de CSN de Frédérique Pédrón en 2000-2001, ainsi que le stage de fin d'études d'ingénieur de Noémi Poblador en 2000 ont été réalisés dans le cadre de cette étude. Les travaux de 2002 à 2005 ont été poursuivis par Thierry Brévault et son équipe.

Sur le plan méthodologique, les résultats obtenus ont montré pour les deux insectes que le pourcentage de feuilles infestées présentait une forte corrélation génétique avec le nombre d'insectes par feuille, avec une héritabilité équivalente. Le comptage du pourcentage de feuilles infestées est apparu par conséquent comme la meilleure méthode d'évaluation, aussi performante et plus rapide que le dénombrement des insectes présents. Le dispositif expérimental que nous avons utilisé, où chaque plant individuel était considéré comme une répétition, s'est avéré permettre une évaluation fiable de la résistance tout en étant compatible avec les faibles quantités de semences disponibles en collection.

Les accessions appartenant à l'espèce *G. arboreum* se sont révélées plus résistantes aux deux insectes que les accessions des espèces *G. barbadense* et *G. hirsutum*. Nous avons confirmé que la pilosité avait un effet négatif significatif sur la résistance aux pucerons. En revanche, et a contrario de la littérature, aucun lien significatif n'a été observé entre la pilosité et la résistance aux jassides. Plusieurs accessions glabres résistantes aux jassides ont ainsi pu être identifiées. Nous avons mis en évidence l'absence de corrélation génétique entre la résistance aux pucerons et la résistance aux jassides, montant ainsi que l'amélioration simultanée de la résistance aux deux ravageurs était envisageable. Le développement de variétés glabres, résistantes aux pucerons et aux jassides, est une perspective prometteuse.

Nibouche, S., Brévault, T., Klassou, C., Dessauw, D., Hau, B. 2008. Assessment of the resistance of cotton germplasm (*Gossypium* spp.) to aphids (Homoptera, Aphididae) and leafhoppers (Homoptera: Cicadellidae, Typhlocybinae): methodology and genetic variability. *Plant Breeding*, 127: 376-382.

Nibouche, S., Beyo, J., Konje Nsuh, C., Pedron, F. 2001. Résistance variétale du cotonnier aux Homoptères : résultats obtenus au Cameroun en 2000. pp. 213-222 in Hau, B. (Ed.) Actes des journées coton du Cirad, Montpellier.

2.4.2. Résistance de la canne à sucre au foreur de tige ponctué *Chilo sacchariphagus*

Le foreur de tige ponctué (Figure 14), *Chilo sacchariphagus* (Bojer), est un des principaux ravageurs de la canne à sucre à la Réunion. La libération de la variété R579 à la Réunion s'est accompagnée d'un accroissement des dégâts sur cette variété par rapport à la variété précédemment cultivée, R570 (Goebel 1999). Ce comportement contrasté des deux variétés a illustré l'intérêt de la résistance variétale dans le contrôle de ce ravageur à la Réunion et a motivé la mise en œuvre d'un programme de recherche sur le sujet.



Figure 14 Larve du foreur de tige ponctué de la canne à sucre, *Chilo sacchariphagus* (photo R. Goebel)

Le principal résultat qui émerge de la littérature publiée sur la résistance de la canne à sucre aux foreurs de tiges est l'existence d'une variabilité génétique de la sensibilité de la canne à ces ravageurs (Mathes et Charpentier 1969, Ashraf et Fatima 1990). Cependant, aucune équipe n'a pu clairement identifier les mécanismes de résistance impliqués. De nombreux caractères morphologiques (dureté ou diamètre de la tige, teneur en fibre, texture des feuilles, teneur en silice, pilosité des feuilles...) sont cités comme étant liés au niveau de résistance des variétés, mais la démonstration de l'implication réelle de ces caractères n'a jamais été faite au-delà de la mise en évidence de corrélations. Du fait de cette méconnaissance des mécanismes de résistance, la sélection pour l'amélioration de la résistance aux foreurs passe par l'évaluation du matériel végétal par quantification de niveaux de dégâts sous infestation naturelle ou artificielle.

L'analyse de la bibliographie consacrée à la résistance variétale aux foreurs de tige des céréales – maïs, sorgho et riz - met en évidence des résistances polygéniques de niveau modéré, avec des mécanismes de résistance variés

(antibiose, antixénose) dont quasiment aucun n'a été clairement identifié. Cette méconnaissance des mécanismes de résistance n'a cependant pas entravé le développement de programmes d'amélioration variétale de la résistance, dès lors que la méthodologie de phénotypage de la résistance était au point.

Chez le maïs, la résistance à la pyrale *Ostrinia nubilalis* a été particulièrement étudiée. La résistance à la première génération du ravageur est due à l'effet d'antibiose du DIMBOA, acide hydroxamique libéré lorsque la chenille consomme les tissus foliaires (Reed *et al.* 1972, Frey *et al.* 1997). Les mécanismes de résistance à la seconde génération d'*O. nubilalis* sont moins bien connus. Il semble (Bergvinson *et al.* 1994) que soit impliqué un accroissement de la résistance mécanique des tissus des feuilles, des gaines foliaires et de la tige, du fait d'une plus forte teneur des génotypes résistants en fibres et en lignine (Beeghly *et al.* 1997, Bergvinson *et al.* 1997, Ostrander et Coors 1997). La résistance multiple du maïs à d'autres foreurs de tiges et défoliateurs (Clavel et Welcker 1996) a été travaillée sur le continent américain contre les *Diatraea* spp. et *Spodoptera frugiperda* et dans l'Ancien Monde principalement contre *Chilo partellus*. Les sources de résistance à ces ravageurs sont constituées quasi exclusivement de matériel originaire des Caraïbes (île d'Antigua). Les travaux de sélection ont permis de créer des variétés présentant des résistances multiples à ces ravageurs, mais les mécanismes de résistance mis en jeu n'ont pas été identifiés. Seuls quelques travaux permettent d'émettre des hypothèses sur certains des mécanismes impliqués : pilosité des feuilles induisant une antixénose d'oviposition (Kumar 1992, Rao et Panwar 2000), épaisseur de la cuticule et des parois des cellules épidermiques (Davis *et al.* 1995).

La résistance aux foreurs du sorgho a été principalement travaillée contre *Chilo partellus*. Les travaux réalisés sur le sous-continent indien fournissent la majorité des références disponibles dans la littérature. Selon la synthèse d'Agrawal *et al.* (1990), des résistances de type antibiose, tolérance et antixénose d'oviposition ont été décrits chez le sorgho. Les mécanismes de résistance principaux sont la précocité d'initiation de la panicule et l'élongation rapide des entre-nœuds. Des travaux ont permis de détecter des corrélations entre niveaux de résistance et teneur des tissus en divers composés ou métabolites (silice, acides aminés, fibres, lignine, sucres), sans que l'implication réelle de ces facteurs puisse être clairement établie. Le rôle de la morphologie des feuilles, de la ligule et des gaines foliaires (pilosité, adhérence à la tige) est évoqué par Kishore (1991).

Dans le cas du riz, d'importants travaux d'amélioration variétale ont été menés pour accroître la résistance aux foreurs de tiges, principalement du genre *Chilo* (Chaudhary et Khush 1990), mais également *Scirpophaga* ou *Sesamia*. Les résistances observées sont d'un niveau modéré, de nature polygénique et agissent en général par antibiose larvaire (Chaudhary et Khush 1990, Ukwungwu 1990). Certains des mécanismes impliqués semblent être liés à la résistance mécanique de la tige et à une plus forte teneur en silice dans les tissus des génotypes résistants (Chandramohan et Chelliah 1984, Ukwungwu 1984, Soliman *et al.* 1997).

Afin de permettre la prise en compte de la résistance à *C. sacchariphagus* dans le processus de création variétale à la Réunion, nous nous sommes intéressés (i) à l'exploration de la diversité des résistances au sein du germplasm de la canne et aux liens génétiques entre résistance et potentiel de production, et (ii) à la mise au point de méthodologies d'évaluation de la résistance compatibles avec un travail de

sélection. Ces travaux ont été menés en collaboration avec le CERF (Centre d'Essai, de Recherche et de Formation), organisme obtenteur de variétés de canne à sucre à la Réunion.

2.4.2.1. Génétique quantitative de la résistance de la canne à sucre à *C. sacchariphagus*

Nous avons mené une étude de génétique quantitative afin de comparer les méthodes décrites dans la littérature pour la quantification des dégâts causés par les foreurs de tige. Ces méthodes allaient du plus simple (taux de tiges attaquées) au plus fastidieux (dissection de tiges et mesure de la longueur des galeries). L'étude a été menée sur 65 cultivars et clones élites du CERF en conditions d'infestation naturelle. L'héritabilité au sens large des méthodes basées sur le dénombrement des orifices d'émergence des chenilles s'est avérée médiocre, alors que les méthodes basées sur le dénombrement des tiges ou des entre-nœuds attaqués ont révélé une héritabilité élevée. Fortement corrélé, génotypiquement et phénotypiquement, avec les autres mesures de dégâts, le pourcentage de tiges attaquées s'est avéré la méthode d'évaluation ayant le meilleur rapport coût/efficacité. L'analyse des corrélations génotypiques a également révélé une corrélation génétique négative entre la résistance au foreur et le rendement en canne, due principalement à une corrélation génétique entre le niveau de dégâts et la longueur des tiges. Aucune corrélation génétique n'a en revanche été observée entre la résistance et les paramètres de teneur en sucre.

2.4.2.2. Exploration de la variabilité de la résistance à *C. sacchariphagus*

L'exploration de la variabilité de la résistance à *C. sacchariphagus* au sein du genre *Saccharum* a été menée au sein d'un échantillon de 32 clones en conditions d'infestation naturelle. Ces clones ont été choisis parmi les extrêmes (sensibles et résistants) après une évaluation préliminaire non statistique de 456 clones commerciaux internationaux de la collection de germplasm du CERF.

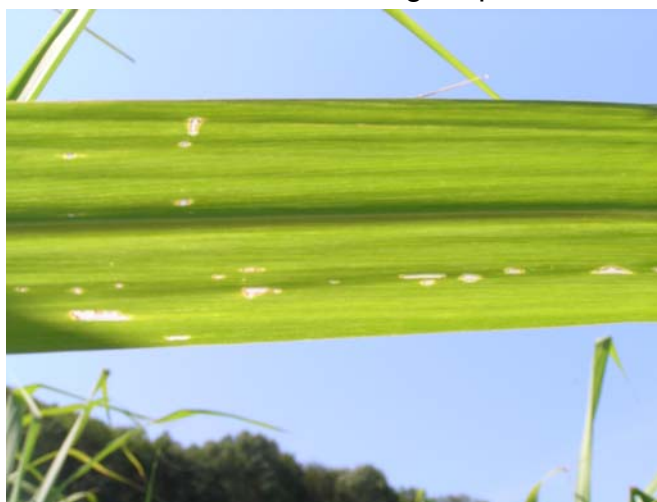


Figure 15 Dégâts foliaires sur la canne à sucre dus aux jeunes larves (L1-L3) de *C. sacchariphagus*.

Des travaux préliminaires de mise au point d'une méthode de quantification des dégâts foliaires causés par les jeunes chenilles (Figure 15) ont été réalisés durant le stage de fin d'études de Julie Lambert en 2005. Au sein de l'échantillon de 32

clones, nous avons mis en évidence une variabilité génotypique significative des niveaux de dégâts foliaires et du taux de galeries présentant un orifice d'émergence (indicateur du taux de chenilles réussissant à achever leur développement larvaire). Aucune corrélation génotypique ou phénotypique n'a été observée entre ces deux variables, ce qui a permis de formuler l'hypothèse de deux mécanismes de résistance génétiquement indépendants localisés l'un dans les feuilles et l'autre dans les tiges. Le niveau de résistance des deux principaux cultivars plantés à la Réunion a été évalué au sein de notre échantillon : R570 s'est révélé l'un des cultivars les plus résistants et R579 ne s'est montré que modérément sensible. Des cultivars résistants ou sensibles ont été identifiés pour les deux mécanismes de résistance et pourraient servir de géniteurs dans de futures études de génétique de la résistance.

Les principales conclusions qui ressortent de ces travaux sur la résistance de la canne à sucre à *C. sacchariphagus* sont en accord avec les résultats obtenus sur la résistance aux foreurs de tiges du maïs, du sorgho ou du riz. Elles montrent que la résistance disponible au sein du germplasm de la canne est une résistance quantitative polygénique d'un niveau modéré. Cette résistance fait intervenir plusieurs mécanismes dotés de contrôles génétiques distincts. L'amélioration de la résistance variétale à *C. sacchariphagus* reste un objectif de sélection réaliste, favorisé par la possibilité de réaliser un phénotypage fiable en conditions d'infestation naturelle à la Réunion.

Nibouche, S., R. Tibère 2009. Genotypic variation of resistance to the spotted stalk borer *Chilo sacchariphagus* (Bojer) in sugarcane: evidence of two distinct resistance mechanisms. *Plant Breeding*, 128: 74-77.

Nibouche, S., R. Tibère 2008. Damage assessment for selection of resistance to the spotted stalk borer and genetic correlations for resistance and yield components in sugarcane. *Plant Breeding*, 127: 38-42.

3e partie Perspectives de recherche

Les perspectives de recherche pour les cinq ans à venir porteront sur deux projets pluridisciplinaires :

- l'étude de la diversité et de la spécificité des résistances de la canne à sucre à la maladie de la feuille jaune
- l'identification de marqueurs moléculaires liés à l'élaboration et à la limitation du rendement chez la canne à sucre par association mapping et phénotypage assisté par modèle

Les travaux prévus sur la maladie de la feuille jaune font pour partie l'objet de la thèse de Benjamin Fartek, en cours depuis fin 2007. Ce projet sera mené en collaboration avec des collègues phytopathologistes, généticiens plante et généticien des populations. Les travaux de recherche de marqueurs moléculaires par association mapping seront menés au travers de la coordination du projet ANR DELICAS durant la période 2009-2012. Ce projet sera mis en œuvre en collaboration avec des collègues écophysiologistes modélisateurs, généticiens plante et biométriciens. Il est prévu qu'une thèse soit réalisée dans le cadre du projet.

3.1. Diversité et spécificité des résistances de la canne à sucre à la maladie de la feuille jaune

3.1.1. Enjeux et état des connaissances

La maladie de la feuille jaune de la canne à sucre, décrite depuis moins de 20 ans, est présente dans la majorité des aires de culture de la planète, où elle peut être à l'origine d'importantes baisses de rendement (Lockhart et Cronjé 2000, Rassaby *et al.* 2003). Ces pertes passent le plus souvent inaperçues car les symptômes de la maladie (jaunissement des feuilles) sont peu caractéristiques. La maladie peut induire des pertes de récolte chez les cultivars sensibles même si ces cultivars ne présentent pas de symptômes (Grisham *et al.* 2001, Grisham *et al.* 2002). Cette maladie est causée par un polérovirus, appartenant à la famille des Luteoviridae, le Sugarcane Yellow Leaf Virus (SCYLV). Plusieurs espèces de pucerons sont capables de transmettre le virus (Schenck et Lehrer 2000), *Melanaphis sacchari*, et *Rhopalosiphum maidis* étant les seuls répertoriés à la Réunion. Cependant les compétences vectorielles de *R. maidis* sont décrites comme faibles et *M. sacchari* est considéré comme le principal vecteur de la maladie sur l'île.

Actuellement, aucun moyen de lutte satisfaisant au plan économique et environnemental n'existe. Les seuls moyens de régénérer des plantes saines sont la culture de méristèmes (Chatenet *et al.* 2001, Fitch *et al.* 2001, Lehrer *et al.* 2001) et la régénération de plantes à partir de cultures de cals (Parmessur *et al.* 2002). Ces techniques sont lourdes à mettre en place à l'échelle d'une zone de culture et ne sont pas efficaces pour contrôler la maladie de la feuille jaune si les pucerons vecteurs et un fort inoculum viral sont présents (Schenck et Lehrer 2000, Rassaby *et al.* 2004). La lutte chimique contre les vecteurs étant d'un intérêt limité dans le contrôle des maladies à virus, l'utilisation de résistances variétales apparaît comme le seul moyen de lutte envisageable. Plusieurs études ont montré que de

nombreuses sources de résistance à la maladie existaient au sein des ressources génétiques utilisées en sélection de part le monde (Schenck et Lehrer 2000, Comstock *et al.* 2001, Victoria *et al.* 2005). L'agent causal de la maladie de la feuille jaune n'ayant été identifié que très récemment, aucun effort de sélection n'a été entrepris à ce jour pour la résistance au SCYLV.

Ces travaux s'inscrivent dans un enjeu de mise au point de stratégies durables de résistance variétale. Une connaissance de la diversité des résistances et de leur contrôle génétique ainsi que celle de la diversité génétique du pathosystème vecteur-virus sont essentielles pour pouvoir, dès le stade de la création variétale, optimiser le choix des sources de résistance et la manière de les combiner. Ces connaissances doivent également permettre d'orienter les stratégies d'utilisation de génotypes résistants en culture, de manière à préserver au mieux leur efficacité. Ces travaux sont également déterminants pour élaborer, à terme, des modèles prédictifs d'évolution des populations de bioagresseurs, pour optimiser les stratégies d'utilisation de la résistance variétale dans le temps et dans l'espace.

3.1.2. Objectifs

Nous nous proposons (i) d'explorer la diversité des résistances à la maladie de la feuille jaune au sein du germplasm de la canne à sucre et (ii) de caractériser le mode d'action, la spécificité et le contrôle génétique de ces résistances.

Quatre axes de travail seront mis en œuvre :

- la recherche de sources de résistance au sein d'une core collection,
- la caractérisation phénotypique et génétique des sources de résistance au virus,
- la caractérisation phénotypique et génétique des sources de résistance au vecteur,
- l'étude de la diversité génétique du vecteur *M. sacchari*.

3.1.2.1. Diversité des résistances au sein du germplasm

L'objectif de cette étude est d'identifier des sources de résistance à la maladie de la feuille jaune au sein d'un échantillon du germplasm cultivé de la canne à sucre. Cette étude sera menée au sein d'une population de 200 cultivars, représentative des géniteurs utilisés en croisement dans le programme de création variétale du CERF. Cette population est celle utilisée dans le cadre des travaux basés sur l'exploitation du déséquilibre de liaison (voir 3.2).

Le phénotypage sera mené en conditions d'infestation naturelle afin d'identifier des cultivars résistants au puceron vecteur *M. sacchari* et/ou indemnes de contamination par le SCYLV. Le phénotypage de la résistance au vecteur sera réalisé par quantification des populations de pucerons. L'incidence du SCYLV sera évaluée par la technique des immuno empreintes (Schenck *et al.* 1997). Les cultivars indemnes de contamination par le SCVYLV seront soumis à des expérimentations d'inoculation contrôlée afin de confirmer leur statut de résistance au virus.

3.1.2.2. Résistance au virus

La résistance au virus sera étudiée dans un premier temps chez le cultivar MQ 76/53, sensible au vecteur *M. sacchari* et résistant au SCYLV. Des travaux de notre

équipe ont permis de mettre en évidence chez ce cultivar un QTL majeur de résistance au SCYLV.

Notre premier objectif sera de réaliser une description phénotypique de la résistance de MQ 76/53, en l'évaluant face à des transmissions par les deux vecteurs *M. sacchari* et *R. maidis*. Cette évaluation de la résistance sera également réalisée face aux deux souches virales présentes à la Réunion. Ces études seront réalisées au travers de tests d'inoculation par puceron vecteur sur des vitroplants sains.

Le second objectif sera de vérifier le contrôle monogénique de la résistance conférée par le QTL majeur présent chez MQ 76/53. Des descendances de croisements du cultivar MQ 76/53 avec des cultivars sensibles seront évaluées pour leur résistance au SCYLV grâce à des inoculations par pucerons virulifères réalisées sur des jeunes plantules issues de semis.

3.1.2.3. Résistance au vecteur

Cette étude visera une caractérisation phénotypique de la résistance à *M. sacchari* identifiée par notre équipe chez le cultivar R 365. Il s'agira dans un premier temps de caractériser le mode d'expression de cette résistance en recherchant l'existence d'une antibiose ou d'une antixénose. Le comportement alimentaire des pucerons sera également analysé par électro-pénétrographie afin de permettre une localisation tissulaire de la résistance. Enfin, la spécificité de la résistance sera étudiée en testant son efficacité sur *R. maidis*. Ces études seront étendues à la vingtaine d'autres cultivars résistants identifiés au sein de la population de 200 cultivars.

Le second volet portera sur l'analyse du déterminisme génétique de cette résistance. Des descendances de croisements du cultivar R 365 avec des cultivars sensibles seront évaluées pour leur résistance aux pucerons afin d'analyser le contrôle génétique de celle-ci. Ces évaluations nécessiteront au préalable la mise au point de méthodes de phénotypage adaptées à la quantité importante de matériel végétal à phénotyper. Un génotypage de certaines de ces descendances pourra être réalisé afin de rechercher des marqueurs associés à la résistance.

3.1.2.4. Diversité génétique du vecteur

La diversité des insectes vecteurs, et notamment celle des pucerons, joue un rôle important dans l'épidémiologie des maladies et dans la résistance des plantes, par le biais de la spécificité de plante hôte (De Barro *et al.* 1995, Vanlerberghe-Masutti et Chavigny 1998) ou de la variabilité intra spécifique des compétences vectorielles (Bencharki *et al.* 2000, Burrows *et al.* 2007). *M. sacchari* semble former un complexe de races ou de sous-espèces de statut taxonomique mal défini (Eastop 1966). Blackman *et al.* (1987) ont séparé l'espèce en deux : *M. sacchari* et *M. sorghi*. L'espèce ou forme *M. indosacchari* (David) est connue en Inde et pourrait être une sous-espèce de *M. sacchari* (Eastop 1966, Blackman *et al.* 1987).

L'objectif de l'étude sera de caractériser la diversité génétique au sein des populations de *M. sacchari*, en relation avec la plante hôte (canne à sucre ou sorgho) et l'origine géographique.

Une collecte mondiale et réunionnaise de *M. sacchari* sera réalisée en vue d'analyser la diversité génétique de l'insecte. Cette diversité génétique sera étudiée

à l'aide de marqueurs microsatellites. Dans un premier temps, des amorces microsatellites publiées chez d'autres espèces de pucerons seront testées sur *M. sacchari*. Si ces amorces s'avèrent inutilisables, une banque enrichie en microsatellites spécifiques de *M. sacchari* sera développée. Ces données SSR seront complétées par des données de séquençage (COII, 12S/16S, EF1α) pour traiter des questions de diversité à l'échelle interspécifique et replacer cette diversité au sein de celle des Aphidini (Kim et Lee 2008).

3.2. Identification de marqueurs de gènes d'intérêt chez la canne à sucre

3.2.1. Enjeux et état des connaissances

L'intensification de la culture cannière est un des objectifs prioritaires pour le maintien de la compétitivité de la filière sucrière à la Réunion. La création de nouvelles variétés de canne, plus productives et résistantes aux bioagresseurs concourt à cet objectif. Le manque de QTL majeurs, ajouté à la complexité du génome de la canne à sucre, constituent les principaux handicaps limitant les apports de la génomique à l'amélioration variétale de la canne à sucre. Seuls quatre gènes majeurs ont été mis en évidence chez la canne à sucre à ce jour, trois contrôlant des résistances à des maladies fongiques et un contrôlant la couleur des tiges (Daugrois *et al.* 1996, Asnaghi *et al.* 2004, Raboin *et al.* 2006, Aljanabi *et al.* 2007). Le contrôle génétique des caractères quantitatifs chez la canne à sucre implique typiquement de nombreux QTL ayant un faible effet individuel. C'est notamment le cas pour plusieurs résistances à des maladies ou ravageurs et pour le contrôle du rendement et de ses composantes (Grivet et Arruda 2001, Hoarau *et al.* 2002, Jordan *et al.* 2004, Reffay *et al.* 2005).

Le déterminisme génétique du rendement est complexe car les composantes du rendement sont en forte interaction avec l'environnement et représentent l'aboutissement de processus multiples difficiles à mesurer. La modélisation de la croissance des plantes peut aider à analyser ce système complexe en formalisant les interactions dynamiques entre les processus biologiques gouvernant la phénologie, la morphogénèse, la production carbonée et son allocation entre organes puits. L'élaboration du rendement peut ainsi être décrite de manière dynamique sous forme de jeu d'équations utilisant un nombre limité de paramètres potentiellement génotype-dépendants (Dingkuhn *et al.* 2005). Ces paramètres de modèle peuvent être considérés comme des traits synthétiques, dont le contrôle génétique serait plus simple que celui de traits agronomiques complexes. Les paramètres, estimés en ajustant le modèle aux observations, devraient être mieux liés à des effets de gènes ou de QTL dans la mesure où ils permettent de réduire le 'bruit' dû à l'interaction génotype x environnement (Hammer *et al.* 2002, Yin *et al.* 2003). Dans cette approche, la variabilité des paramètres entre génotypes est interprétée comme une expression de la diversité allélique. Le phénotypage assisté par modèle a déjà été utilisé sur l'orge (Yin *et al.* 1999), le maïs (Reymond *et al.* 2003) ou le pêcher (Quilot *et al.* 2004, 2005). Le développement de modèles de croissance de la canne ou de céréales dont le fonctionnement est proche de celui de la canne (Martiné 2003, Luquet *et al.* 2006) permet d'envisager d'appliquer le phénotypage assisté par modèle à la canne à sucre.

A ce jour, la plupart des détections de QTL chez la canne à sucre ont été conduites sur des descendances bi-parentales créées spécifiquement pour analyser un caractère d'intérêt. Ces dernières années, l'étude du déséquilibre de liaison (DL) est devenu un sujet d'intérêt majeur chez les plantes (Flint-Garcia *et al.* 2003, Gupta *et al.* 2005). Le DL est l'association non aléatoire d'allèles à des loci distincts dans une population. A la différence des études d'association basées sur des descendances, la génétique d'association basée sur l'exploitation du DL (association mapping) permet de travailler sur des populations de cultivars. La possibilité d'utiliser une approche DL chez la canne a été avancée par Janoo *et al.* (1999). Le DL chez la canne à sucre est la conséquence de l'historique récent de la sélection de cette plante. Peu de générations séparent les cultivars actuels des quelques ancêtres fondateurs utilisés au début du 20^e siècle, avec pour conséquence un nombre limité de méioses et donc de possibilités de recombinaisons chromosomiques. Une étude récente (Raboin *et al.* 2008) a précisé l'étendue du DL chez la canne et confirmé la pertinence de l'approche association mapping chez cette plante. Les avantages de cette démarche sont notamment la possibilité de décrire les caractéristiques agronomiques de variétés directement utilisables en sélection. Elle requiert en revanche la production d'une quantité de marqueurs moléculaires plus importante en raison de l'extinction rapide du déséquilibre de liaison avec la distance génétique.

3.2.2. Objectifs

Le projet a pour objectif d'identifier chez la canne à sucre des marqueurs moléculaires associés à des gènes impliqués dans l'élaboration du rendement ou à la résistance à certains bioagresseurs, en utilisant une démarche d'association mapping.

Les travaux seront mis en œuvre suivant trois axes:

- la mise au point de méthodes et d'outils pour le phénotypage assisté par modèle écophysologique,
- le phénotypage d'une core collection (i) pour l'élaboration du rendement, par modèles écophysologiques, et (ii) pour la résistance à plusieurs maladies ou ravageurs,
- le génotypage de la core collection en combinant des marqueurs DArT, AFLP et SSR, et la détection d'associations marqueurs – traits.

3.2.2.1. Méthodes et outils pour le phénotypage assisté par modèles

L'objectif de l'étude sera de mettre au point la méthodologie et de tester la validité de la démarche de phénotypage assisté par modèle. Le phénotypage assisté par modèle sera mis en œuvre en utilisant deux modèles complémentaires de conception différente. Le premier, Mosicas, est un modèle agronomique de type 'big leaf' qui représente l'élaboration du rendement par des mécanismes élémentaires : interception de l'énergie lumineuse, conversion en biomasse et partition de la biomasse entre organes puis entre hydrates de carbone de structure et sucre. Le second modèle, EcoMeristem, a été développé sur le riz et adapté au sorgho. EcoMeristem est un modèle morphogénétique qui simule la topologie des plantes, l'émission et la taille des organes, par la modélisation du fonctionnement des méristèmes et des relations sources-puits de carbone. EcoMeristem est supposé plus proche du fonctionnement des gènes, tandis que Mosicas est plus adapté à la

représentation du comportement agronomique des variétés. Nos objectifs seront (i) de mettre au point une version canne à sucre du modèle EcoMeristem, (ii) de vérifier l'existence d'une variabilité génotype significative sur les paramètres des modèles et l'absence d'interaction paramètres x environnement.

Dans un premier temps, l'adaptation du modèle EcoMeristem à la canne à sucre portera sur des modifications nécessaires pour prendre en compte des particularités de la canne à sucre, telles que l'installation de la plante à partir de boutures ou la capacité des entre-nœuds à attirer et stocker des hydrates de carbone non structuraux. Les données utilisées seront issues (i) d'un suivi de croissance de deux variétés dans un essai statistique et (ii) de données d'archives issues des travaux menés sur le modèle Mosicas.

Dans un deuxième temps, une première étude de phénotypage assisté par modèles sera réalisée sur 20 variétés. La croissance de ces variétés sera suivie dans deux essais installés dans des environnements contrastés. Ces données serviront à caler les paramètres des modèles pour les 20 variétés et à tester les hypothèses sur lesquelles repose la démarche de phénotypage assisté par modèle.

3.2.2.2. Phénotypage de la core collection

La core collection sur laquelle portera le phénotypage compte 200 cultivars internationaux, représentatifs de la collection de géniteurs utilisée par le CERF dans son programme de création variétale. Deux types de phénotypages seront réalisés. Le premier sera le phénotypage assisté par modèles écophysiologiques, utilisant les outils et méthodes développés précédemment. Deux essais statistiques mis en place dans deux environnements contrastés serviront à l'acquisition des données permettant l'estimation des paramètres des deux modèles.

La seconde série de phénotypages portera sur la résistance aux maladies et ravageurs d'importance économique mondiale présents à la Réunion : maladie de la feuille jaune, foreur ponctué, rouille brune, yellow spot, charbon, gommose et échaudure. Des essais statistiques seront mis en place sur différents sites de l'île où l'incidence des bioagresseurs étudiés est suffisante en conditions naturelles. Des inoculations artificielles seront réalisées pour les maladies dont l'incidence en conditions naturelles est faible.

3.2.2.3. Génotypage et association mapping

La population de cultivars utilisée dans l'étude sera génotypée en utilisant les techniques AFLP, SSR et DArT. Les AFLP et les SSR ont déjà été utilisés dans des études d'association mapping chez la canne à sucre (Raboin 2005, Wei *et al.* 2006). La technologie DArT, Diversity Array Technologie, (Jaccoud *et al.* 2001), basée sur une hybridation ADN/ADN sur puces, est une technique à haut débit récente qui a été validée sur la canne à sucre (D'Hont *et al.* comm. pers.).

La détection des associations entre marqueurs et traits phénotypiques (paramètres de modèles ou niveau de résistance aux bioagresseurs) sera réalisée en deux étapes : (i) analyse de la structuration génétique au sein de la core collection, (ii) détection d'associations statistiquement significatives entre marqueurs et traits.

4e partie Publications scientifiques et documents à vocation de transfert

4.1.1. Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture, répertoriées dans des bases de données internationales

- 4.1.1.1. Brévault, T., Oumarou, Y., Achaleke, J., Vaissayre, M., Nibouche, S. 2009. Initial activity and persistence of insecticides for the control of bollworms (Lepidoptera: Noctuidae) in cotton crops. *Crop Protection*, 28: 401-406.
- 4.1.1.2. Nibouche, S., R. Tibère 2009. Genotypic variation of resistance to the spotted stalk borer *Chilo sacchariphagus* (Bojer) in sugarcane: evidence of two distinct resistance mechanisms. *Plant Breeding*, 128: 74-77.
- 4.1.1.3. Nibouche, S., T. Brévault, C. Klassou, D. Dessauw, B. Hau 2008. Assessment of the resistance of cotton germplasm (*Gossypium* spp.) to aphids (Homoptera, Aphididae) and leafhoppers (Homoptera: Cicadellidae, Typhlocybinae): methodology and genetic variability. *Plant Breeding*, 127: 376-382.
- 4.1.1.4. Nibouche, S., Tibère, R. 2008. Damage assessment for selection of resistance to the spotted stalk borer and genetic correlations for resistance and yield components in sugarcane. *Plant Breeding*, 127: 38-42.
- 4.1.1.5. Nibouche, S., Gozé, E., Babin, R., Beyo, J., Brévault, T. 2007. Modeling *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) damages on cotton. *Environmental Entomology*, 36:151-156.
- 4.1.1.6. Abu Ahmad, Y., Costet, L., Daugrois, J.-H., Nibouche, S., Letourmy, P., Girard, J.-C., Rott, P. 2007. Variation in virulence exists between genotypes of Sugarcane yellow leaf virus. *Plant Disease*, 91: 253-259.
- 4.1.1.7. Nibouche, S., Guérard, N., Martin, P., Vaissayre, M. 2007. Modelling the role of refuges for sustainable management of dual-gene Bt Cotton in West African smallholder farming systems. *Crop Protection*, 26: 828-836.
- 4.1.1.8. Nibouche, S., Babin, R., Beyo, J., Gozé, E. 2004. Within Plant Distribution of Cotton Boll-infesting Lepidoptera. Application to Sampling. *Environmental Entomology*, 33: 1458-1464.
- 4.1.1.9. Beyo, J., Nibouche, S., Gozé, E., Deguine, J.P. 2004. Application of Probability Distribution to the Sampling of Cotton Bollworms (Lepidoptera: Noctuidae) in Northern Cameroon. *Crop Protection*, 23: 1111-1117.
- 4.1.1.10. Gozé, E., Nibouche, S., Deguine, J.P. 2003. Spatial and Probability Distribution of *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera, Noctuidae) in Cotton. Systematic Sampling, Exact Confidence Intervals and Sequential Test. *Environmental Entomology*, 32: 1203-1210.
- 4.1.1.11. Silvie, P., J.P. Deguine, S. Nibouche, B. Michel and M. Vaissayre 2001. Potential of threshold-based interventions for cotton pest control by small farmers in West Africa. *Crop Protection*, 20: 297-301.
- 4.1.1.12. Nibouche, S., Faure, G., Kleene, P. & Ouedraogo, S. 1998. First step toward integrated pest management on cotton in Burkina Faso. *Crop Protection*, 17: 697-701.

- 4.1.1.13. Nibouche, S., Buès, R., Toubon, J.F., Poitout, S. 1998. Allozyme polymorphism in the American cotton bollworm *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae): comparison of African and European populations. *Heredity*, 80: 438-445.
- 4.1.1.14. Nibouche, S. 1998. High temperature induced diapause in the cotton bollworm *Helicoverpa armigera*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 87: 271-274.
- 4.1.1.15. Streito, J.C., Nibouche, S. 1997. First observations on the parasitoids associated with lepidopterous pests of cotton in Burkina Faso. *Entomophaga*, 42: 543-557.

4.1.2. Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture, non répertoriées dans des bases de données internationales

- 4.1.2.1. Nibouche, S., Gozé, E. 1993. Efficacité et rentabilité de la protection phytosanitaire vulgarisée en culture cotonnière au Burkina Faso. *Coton et Fibres Tropicales*, 48 : 177-193
- 4.1.2.2. Nibouche, S. 1992. Acariens, diplopodes et insectes phytophages associés à la culture cotonnière au Burkina Faso. *Coton et Fibres Tropicales*, 47 : 305-311

4.1.3. Articles dans des revues sans comité de lecture

- 4.1.3.1. Vaissayre, M., Martin, P., Nibouche, S. 2006. Key factors for Bt cotton sustainability in smallholder farming: a modelling approach. *Bulletin IOBC/WPRS*, 29: 193-196.
- 4.1.3.2. Nibouche, S., Martin, P., Vaissayre, M. 2003. A modelling approach of the sustainability of Bt cotton grown by small farmers in West Africa. *Resistant Pest Management Newsletter*, 13: 55-58.
- 4.1.3.3. Nibouche, S., Beyo, J., Brévault, T. 2002. Negative cross insensitivity in a dimethoate resistant strain of Cotton Aphid *Aphis gossypii* Glover in Northern Cameroon. *Resistant Pest Management Newsletter*, 12: 25-26.
- 4.1.3.4. Vaissayre, M., Menozzi, P., Nibouche, S. & Deguine J.-P. 1998. Les aleurodes dans les systèmes de culture cotonniers : biologie et gestion des populations. *Agriculture et développement*, 20 : 4-12.
- 4.1.3.5. Nibouche, S., de Chazeaux, R., Deguine, J.-P., Martin, J. & Vaissayre, M. 1998. Dégâts dus à l'aleurode *Bemisia tabaci* (Gennadius) en culture cotonnière : évolutions récentes en Afrique de l'Ouest. *Agriculture et développement*, 20 : 13-18.
- 4.1.3.6. Streito, J.C. & Nibouche, S. 1998. Biologie et écologie de *Syagrus calcaratus* (F.), ravageur de la culture cotonnière au Burkina Faso (Coleoptera, Chrysomelidae). *Bulletin de la Société Entomologique de France*, 103: 51-56

4.1.4. Communications avec actes dans un congrès international ou national

- 4.1.4.1. Garsmeur O., Le Cunff L., Royaert S., Zini C., Raboin L.M., Hoarau J.Y., Telismart H., Hervouet C., Nibouche S., Costet L., D'Hont A. 2009. Characterization of the Bru1 (brown rust resistance) locus : Distribution in modern sugarcane cultivars. W242, Intl. Consortium for Sugarcane Biotech. (ICSB).. *In* : Abstracts of Plant and Animal Genomes XVII Conference, San Diego, CA (USA), January 10-14, 2009. [Online]. [S.l.] : s.n.. Plant and Animal Genomes Conference. 17, 2009-01-10/2009-01-14, San Diego, Etats Unis.

- 4.1.4.2. Royaert S., Le Cunff L., Costet L., Raboin L.M., Hoarau J.Y., Telismart H., Hervouet C., Garsmeur O., Nibouche S., D'Hont A. 2008. Characterization of the Bru1 (brown rust resistance) locus; distribution in sugarcane cultivars. In : Joint ISSCT IX Plant Pathology and VI Molecular Biology Workshop ; ISSCT ; CENICANA. Advances and challenges in sugarcane biotechnology and plant pathology: proceedings. Cali : ISSCT, 1 p.. ISSCT Molecular Biology Workshop. 6, 2008-06-23/2008-06-27, Cali, Colombie.
- 4.1.4.3. Hoarau J.Y., Costet L., Nibouche S., Roques D., Daugrois J.H., D'Hont A. 2008. Applications de la génomique à l'innovation variétale chez la canne à sucre. In : AFCAS. 4ème Rencontre internationale francophone, 11 au 14 mars 2008, Le Gosier, Guadeloupe. AFCAS.
- 4.1.4.4. Raboin L.M., Nibouche S., Pauquet J., Telismart H., Dintinger J., Hoarau J.H., Costet L., D'Hont A. 2006. Genetic mapping of sugarcane resistance to smut through bi-parental segregation and associations among modern cultivars. In: Daugrois J-H. (ed) VIIIth ISSCT Pathology Workshop Petit-Bourg, Guadeloupe (FWI), 23-27 January 2006, programme and abstracts. CIRAD, ISSCT, Petit-Bourg, Guadeloupe.
- 4.1.4.5. Nibouche, S., Martin, P., Crétenet, M., Jallas, E., Turner, S. 2003. COTONSIMBAD system : modeling feeding behavior of cotton bollworms for evaluation of crop pest interactions. In : Proceedings of the Beltwide Cotton Conferences 2003. NCCA, Nashville.
- 4.1.4.6. Nibouche, S., Beyo, J., Brévault, T., Crétenet, M., Gozé, E., Jallas, E., Martin, P., Moussa, A. A. 2003. Cotton bollworm economic injury levels based on crop model predictions: another use of the COTONS model. In: Proceedings of the third World Cotton Research Conference, Cape Town, South Africa, 2003 march 9-13. ICAC.
- 4.1.4.7. Brévault, T., Asfom P., Beyo, J., Nibouche S. & M. Vaissayre, 2002. Assessment of *Helicoverpa armigera* resistance to pyrethroid insecticides in Northern Cameroon. Med. Fac. Landbouww. Univ. Gent, 67/3, 641-646.
- 4.1.4.8. Nibouche, S., Beyo, J., Brévault, T., Crétenet, M., Gozé, E., Jallas, E., Martin, P., Moussa, A. A. (2002) Cotons®-Simbad : a tool for establishing Cotton Bollworm economic damage thresholds. pp 307-308 in Villalobos, F. J., Testi, L. (eds) VII Congress of the European Society for Agronomy, Cordoba, 15-18 July 2002. Junta de Analucia, Sevilla.
- 4.1.4.9. Moussa A.A., Nibouche S., Gautier D. 2003. Passer du diagnostic à la prospective : outils et méthodes pour l'action et l'aide à la décision. In: Jamin Jean-Yves (ed.), Seiny Boukar L. (ed.), Floret Christian (ed.). Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque, Garoua, Cameroun, 27-31 mai 2002. CIRAD, Montpellier.
- 4.1.4.10. Nibouche, S., J. Beyo, E. Gozé 2002. Mise au point de plans d'échantillonnage pour la protection sur seuil contre les chenilles de la capsule du cotonnier. In Jamin J.Y., Seiny Boukar L. (eds). Actes du colloque savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis, Garoua, mai 2002. Prasac, N'Djamena, Tchad.
- 4.1.4.11. Nibouche, S., J. Beyo, A. Djonnewa, I. Goipaye, A. Yandia 2002. La Lutte Étagée Ciblée a-t-elle un avenir en Afrique centrale ? In Jamin J.Y., Seiny Boukar L. (eds). Actes du colloque savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis, Garoua, mai 2002. Prasac, N'Djamena, Tchad.
- 4.1.4.12. Nibouche, S., J. Beyo, T. Brévault, M. Crétenet, E. Gozé, E. Jallas, P. Martin, A. A. Moussa, 2002. Cotons® - Simbad : un outil pour la mise au point de seuils d'intervention contre les chenilles de la capsule en culture cotonnière. In Jamin J.Y., Seiny Boukar L. (eds). Actes du colloque savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis, Garoua, mai 2002. Prasac, N'Djamena, Tchad.

- 4.1.4.13. Moussa, A. A., Crétenet, M., Nibouche, S., Gaborel, C. 2002. Étude de l'impact d'une attaque précoce de chenilles de la capsule sur le rendement en coton graine en fonction de la pluviosité au Nord Cameroun. In Jamin J.Y., Seiny Boukar L. (eds). Actes du colloque savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis, Garoua, mai 2002. Prasac, N'Djamena, Tchad.
- 4.1.4.14. Nibouche, S., R. Babin, J. Beyo, L. Escalon 2002. Sensibilité aux organophosphorés et aux carbamates chez le puceron *Aphis gossypii* Glover et l'aleurode *Bemisia tabaci* (Gennadius) au Nord Cameroun. pp 45-58 in Brévault, T., S. Nibouche (eds) Actes de l'atelier sur la résistance des insectes aux insecticides en Afrique de l'ouest et du centre, Maroua, 6-7 mars 2002. Prasac, N'Djaména, Tchad.
- 4.1.4.15. Beyo, J ., T. Brévault, S. Nibouche, P. Asfom 2002. Sensibilité aux insecticides pyréthrinoides chez *Helicoverpa armigera* au Nord Cameroun. pp 31-34 in Brévault, T., S. Nibouche (eds) Actes de l'atelier sur la résistance des insectes aux insecticides en Afrique de l'ouest et du centre, Maroua, 6-7 mars 2002. Prasac, N'Djaména, Tchad.
- 4.1.4.16. Nibouche, S., Beyo, J., Konje Nsuh, C., Pedron, F. 2001. Résistance variétale du cotonnier aux Homoptères : résultats obtenus au Cameroun en 2000. pp. 213-222 in Hau, B. (Ed.) Actes des journées coton du Cirad. CIRAD, Montpellier.
- 4.1.4.17. Babin, R., Beyo, J., Fesneau, A., Nibouche, S., Konje Nsuh, C. 2000. Sensibilité aux organophosphorés chez le puceron *Aphis gossypii* Glover au Nord Cameroun. pp 203-208 in Laodjassondo, P.K. (Ed.) Réunion phytosanitaire du Réseau Coton, Lomé, 22-25 février 2000. Coraf, Itra, Lomé.
- 4.1.4.18. Beyo, J., de Chazeaux, R., Nibouche, S., Konje Nsuh, C. & Gozé, E. 1999. Rationalisation des traitements insecticides contre les chenilles carpophages du cotonnier. pp 51-54 in Hau, B. (Ed.) Actes des journées coton du Cirad, Montpellier, 16-23 juillet 1999. CIRAD, Montpellier.
- 4.1.4.19. Nibouche, S., Babin, R., Barvec, F., Beyo, J., de Chazeaux, R., Konje Nsuh, C. 1999. Quantification du rôle des aphidiphages dans les fluctuations des populations d'*Aphis gossypii* Glover au Nord Cameroun. pp 55-58 in Hau, B. (Ed.) Actes des journées coton du Cirad, Montpellier, 16-23 juillet 1999. CIRAD, Montpellier.
- 4.1.4.20. Babin, R., Beyo, J., de Chazeaux, R., Nibouche, S., Konje Nsuh, C. 1999. Mise au point de tests de sensibilité aux organophosphorés chez le puceron *Aphis gossypii* et l'aleurode *Bemisia tabaci* (Gennadius). pp 59-63 in Hau, B. (Ed.) Actes des journées coton du Cirad, Montpellier, 16-23 juillet 1999. CIRAD, Montpellier.
- 4.1.4.21. Nibouche, S., Beyo, J., de Chazeaux, R., Konje Nsuh, C. 1999. Induction de pullulations du puceron *Aphis gossypii* Glover en culture cotonnière par un insecticide pyréthrinoides. pp 223-227 in Hau, B. (Ed.) Actes des journées coton du Cirad, Montpellier, 16-23 juillet 1999. CIRAD, Montpellier.
- 4.1.4.22. Beyo J., Nibouche S., Babin R., Gozé E. 1999. Echantillonnage intra-plant des chenilles carpophages du cotonnier. pp. 881-896 In : Cinquième conférence internationale sur les ravageurs en agriculture, 07-09 décembre 1999, Montpellier. ANPP, Paris.
- 4.1.4.23. Silvie, P., J.P. Deguine, S. Nibouche, B. Michel and M. Vaissayre. 1998. Procedures, advantages and constraints of Staggered Targeted Control programmes on cotton in West Africa. pp 829-832 in Gillham, F. (Ed.) New Frontiers in Cotton Research: Proc. World Cotton Research Conference II. WCRC-2 Organizing and Scientific Committees, Athens.
- 4.1.4.24. Gozé, E., S. Nibouche and J.P. Deguine. 1998. Bollworm sampling to determine action thresholds in sub-Saharan Africa: Spatial and probability distribution. pp 883-884 in Gillham,

F. (Ed.) New Frontiers in Cotton Research: Proc. World Cotton Research Conference II. WCRC-2 Organizing and Scientific Committees, Athens.

- 4.1.4.25. Gozé, E. Nibouche, S. & Deguine, J.P. 1998. Echantillonnage au champ d'*Helicoverpa armigera* pour le traitement sur seuil d'intervention. Répartition spatiale et loi de probabilité. *in* : Journées coton du Cirad-ca. CIRAD, Montpellier.
- 4.1.4.26. De Chazeaux R., Nibouche S. 1997. La maladie des cotonniers rouges au Nord-Cameroun : identification des causes du phénomène et étude de méthodes de lutte. Synthèse des expérimentations menées en 1996. pp.143-152 *in* : Réunion phytosanitaire de l'Afrique de l'Ouest et du Centre, Cotonou, 27-31 janvier 1997. CORAF, Abidjan.
- 4.1.4.27. Mianze T., Follin J.C., Klassou C., Ekorong J., Nibouche S., Bachelier B. 1997. Evolutions techniques et économiques de la filière cotonnière. Compte rendu des discussions du groupe de travail III. pp. 437-439 *in* : Seiny Boukar L. (ed.), Poulain Jean-François (ed.), Faure Guy (ed.). Agricultures des savanes du Nord-Cameroun. Vers un développement solidaire des savanes d'Afrique Centrale. Actes. CIRAD, Montpellier.
- 4.1.4.28. Deguine J.P., Ekukole G., Nibouche S. 1997. Lutte étagée ciblée et pulvérisation à très bas volume. Une protection insecticide du cotonnier moins onéreuse et plus respectueuse de l'environnement. pp. 505-506 *in* : Seiny Boukar L. (ed.), Poulain Jean-François (ed.), Faure Guy (ed.). Atelier d'échange agricultures des savanes du nord-Cameroun : vers un développement solidaire des savanes d'Afrique centrale, 25-29 novembre 1996, Garoua, Cameroun. CIRAD, Montpellier.
- 4.1.4.29. Nibouche S. 1995. Cycle évolutif de *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera, Noctuidae) dans l'Ouest du Burkina Faso. pp 281-288 *in*: Ratnadass A. & Girardot B. (Eds.) Réunion de coordination phytosanitaire, cultures annuelles, Afrique de l'Ouest, Bamako, CIRAD-CA, IER, CORAF.
- 4.1.4.30. Nibouche S. 1989. Protection phytosanitaire du cotonnier au Burkina Faso. pp. 137-145 *in*: Berger M. & Frydrych D. (Eds.) Première conférence de la recherche cotonnière africaine, volume 2, Lomé, CIRAD-IRCT.

4.1.5. Communications orales sans actes dans un congrès international ou national

- 4.1.5.1. Martin P., Nibouche S., Clouvel P. 2008. Simulation of bollworm damages on cotton. *In*: ENDURE, Workshop on DSS for Crop Protection, 17-19 March, 2008, Flakkebjerg, Denmark.
- 4.1.5.2. Nibouche S., Kapsa J. 2008. Results of a survey on decision support systems for pest control in EU-countries. *In*: ENDURE, Workshop on DSS for Crop Protection, 17-19 March, 2008, Flakkebjerg, Denmark.
- 4.1.5.3. Nibouche S. 2007. Interventions sur seuils : concepts et définitions. *In* : Journées d'animation scientifique des UPRs coton, 10-12 juillet 2007, Montpellier.

4.1.6. Communications par affiche dans un congrès international ou national

- 4.1.6.1. Fartek B., Nibouche S., Costet L., Reynaud B. 2008. Characterization of sugarcane resistance to *Melanaphis sacchari* using biological tests and Electrical Penetration Graph (DC-EPG). "Plant interactions with aphids and other insects with peircing mouthparts", Wageningen, Netherland.

- 4.1.6.2. Nibouche S., Kapsa J. 2008. Results of a survey on decision support systems for pest control in EU-countries. "Diversifying Crop Protection", conférence internationale du réseau ENDURE, La Grande-Motte (12-15 Octobre 2008).
- 4.1.6.3. Vaissayre M., Martin P., Nibouche S. 2005. Key factors for Bt cotton sustainability in smallholder farming: a modelling approach. In: IOBC/wprs Working Group on 'GMOs in Integrated Plant Production' Meeting on Ecological Impact of Genetically Modified Organisms. June 1-3, 2005, Lleida, Spain. IOBC.
- 4.1.6.4. Nibouche, S. & de Chazeaux, R. 1998. Role of *Bemisia tabaci* in the red cotton disease in Cameroon. 2nd International Workshop on *Bemisia* and Geminiviruses, San Juan, Porto-Rico.

4.1.7. Ouvrages scientifiques

- 4.1.7.1. Youm, O., Srinivasan Sithanantham, Nibouche, S., Martin, T., Ochou, G. O., Vaissayre, M., Momanyi, G. 2005. Bio-ecology and management of *Helicoverpa* for sustainable crop production in Africa. pp 63-90 in Hari C. Sharma (ed.) *Heliothis/Helicoverpa management: emerging trends and strategies for future research*. Oxford and IBH Publishing Co. Pvt. Ltd, New Delhi.
- 4.1.7.2. Nibouche, S. 1999. *Helicoverpa armigera* (Hübner, 1808) (Lepidoptera : Noctuidae). Série *Les déprédateurs du cotonnier et Afrique tropicale et dans le reste du monde*, n°12. CIRAD, Montpellier, 51 p.

4.1.8. Ouvrages de vulgarisation

- 4.1.8.1. Nibouche S. 1995. *Helicoverpa armigera*. pp 33-35 in : Toé J.B. & Tourigny G. (Eds) Guide de protection phytosanitaire des cultures au Burkina Faso. DPVC, INERA, Agriculture Canada, Ouagadougou
- 4.1.8.2. Nibouche S. 1992. Principaux ravageurs du cotonnier au Burkina Faso. INERA, CIRAD-IRCT, Bobo-Dioulasso, 8 p.

4.1.9. Thèses soutenues

- 4.1.9.1. Nibouche, S. 1994. Cycle évolutif de *Helicoverpa armigera* (Hübner, 1808) (Lepidoptera, Noctuidae) dans l'Ouest du Burkina Faso : biologie, écologie et variabilité géographique des populations. Thèse de Doctorat, ENSA Montpellier, 143 p.
- 4.1.9.2. Nibouche, S. 1988. Contribution à l'étude de modèles d'herbicides à partir d'exsudats racinaires. Mémoire DAA, ENSA Toulouse, CIRAD-IRCT, 39 p.

4.1.10. Logiciels

- 4.1.10.1. Jallas E., Crétenet M., Martin P., Turner S., Nibouche S. 2002. CotonSimbad. Release 1.0. Cédérom. IRAD, PRASAC, CIRAD, Montpellier .

4.1.11. Autres publications

- 4.1.11.1. Been, T., Berti, A., Evans, N., Gouache, D., Gutsche, V., Jensen, J.E., Kapsa, J., Levay, N., Munier-Jolain, N., Nibouche, S., Raynal, M., Rydahl, P. 2009. Review of new technologies critical to effective implementation of Decision Support Systems (DSS's) and Farm Management Systems (FMS's). Endure Network, Aarhus University, Denmark, 129 p.
- 4.1.11.2. Nibouche S., Martin P., Crétenet M., Vaissayre M. 2006. Cotons®-Simbad : un modèle pour réduire l'usage de pesticides. CIRAD, Montpellier, 2p.
- 4.1.11.3. Brévault T., Nibouche S. 2002. Résistance des insectes aux insecticides en Afrique de l'ouest et du centre. Actes de l'atelier, 06-07 mars 2002, Maroua, Cameroun. Volume 1 : résumés et recommandations. Volume 2 : communications et présentations. IRAD, PRASAC, CIRAD, Montpellier, 120 p.
- 4.1.11.4. Nibouche S., Beyo J., Gozé, E. 2002. L'échantillonnage des chenilles de la capsule du cotonnier. Fiche technique n°1. IRAD, PRASAC, CIRAD, Montpellier, 2p.
- 4.1.11.5. Nibouche S., Beyo J., Gozé, E. 2002. L'échantillonnage séquentiel des chenilles de la capsule du cotonnier. Fiche technique n°3. IRAD, PRASAC, CIRAD, Montpellier, 2p.
- 4.1.11.6. Nibouche S., Beyo J., Gozé, E. 2002. L'échantillonnage des chenilles de la capsule du cotonnier : calcul de l'intervalle de confiance d'un sondage. Fiche technique n°4. IRAD, PRASAC, CIRAD, Montpellier, 2p.
- 4.1.11.7. Toé A., Nibouche S., Pinchard V. 1991. Actes de la Réunion de coordination de recherche phytosanitaire cotonnière de Ouagadougou. CIRAD-IRCT, Paris, 289 p.

Bibliographie

- Abney, R. M., Sorenson, C. E., Bradley, J. R. J., 2003. pp 1163-1167 in Proceedings of the 2003 Beltwide Cotton Conferences, Nashville, TN. National Cotton Council, Memphis, TN.
- Agarwal, R. A., Banerjee, S. K., Katiyar, K. N., 1978. *Coton et Fibres Tropicales* 33: 409-414.
- Agrawal, B. L., Taneja, S. L., House, L. R., Leuschner, K., 1990. *Insect Science and its Application* 11: 671-682.
- Aljanabi, S., Parmessur, Y., Kross, H., Dhayan, S., Saumtally, S., Ramdoyal, K., Autrey, L. J. C., Dookun-Saumtally, A., 2007. *Molecular breeding* 19: 1-14.
- Anglade, P., 1969. *Bull. Soc. Entomol. Fr.* 74: 59-63.
- Ashraf, M., Fatima, B., 1990. *Insect Science and its Application* 11: 683-687.
- Asnaghi, C., Roques, D., Ruffel, S., Kaye, C., Hoarau, J. Y., Télismart, H., Girard, J. C., Raboin, L. M., Risterucci, A. M., Grivet, L., D'Hont, A., 2004. *Theor. Appl. Genet.* 108: 759-764.
- Baker, D. N., Lambert, J. R., McKinion, J. M., 1983. GOSSYM: a simulator of cotton crop growth and yield. *S. C. Agri. Exp. Sta. Tech. Bull.*, 1089. 134 pp.
- Beeden, P., 1972. *PANS* 18 43-45.
- Beeghly, H., Coors, J., Lee, M., 1997. *Maydica* 42: 297-303.
- Bencharki, B., El Yamani, M., Zaoui, D., 2000. *Eur. J. Plant. Pathol.* 106: 455-464.
- Bergvinson, D. J., Arnason, J. T., Hamilton, R. I., Mihm, J. A., Jewell, D. C., 1994. *Journal of Economic Entomology* 87: 1743-1748.
- Bergvinson, D. J., Arnason, J. T., Mihm, J. A., Jewell, D. C., 1997. pp 82-90 in *Insect resistant maize: recent advances and utilization. Proceedings of an International Symposium held at the International Maize and Wheat Improvement Center, 27 November-3 December 1994. CIMMYT; Mexico City; Mexico.*
- Binns, M. R., Nyrop, J. P., van der Werf, W., 2000. *Sampling and monitoring in crop protection: the theoretical basis for developing practical decision guides.* CABI Publishing, Oxon, UK. pp.
- Blackman, R. L., Eastop, V. F., Brown, P. A., 1987. pp 197-214 in *World perspectives on Barley Yellow Dwarf.* International Maize and Wheat Improvement Center.
- Brévault, T., Couston, L., Bertrand, A., Thézé, M., Nibouche, S., Vaissayre, M., submitted. *Crop Protection*
- Brook, K. D., Hearn, A. B., Kelly, C. F., 1992. *Journal of Economic Entomology* 85: 1368-1377.
- Brookes, G., Barfoot, P., 2006. *GM Crops: The First Ten Years - Global Socio-Economic and Environmental Impacts.* Brief 36. ISAAA, Ithaca, NY. pp.
- Buès, R., Hmimina, M., Poitout, S., Gabarra, R., 1989. *J. Appl. Ent.* 107: 376-386.
- Burrows, M. E., Caillaud, M. C., Smith, D. M., Gray, S. M., 2007. *Heredity* 98: 106-113.
- Butler, G. D. J., Wilson, L. T., Henneberry, T. J., 1985. *Journal of Economic Entomology* 78: 320-324.
- Caprio, M. A., 1994. *Biocontrol Sci. & Technol.* 4: 487-497.
- Chandramohan, N., Chelliah, S., 1984. *International Rice Research Newsletter* 9: 16.
- Chatenet, M., Delage, C., Ripolles, M., Irey, M., Lockhart, B. E. L., Rott, P., 2001. *Plant Dis.* 85: 1177-1180.
- Chaudhary, R. C., Khush, G. S., 1990. *Insect Science and its Application* 11: 659-669.
- Clavel, D., Welcker, C., 1996. *Cahiers Agricultures* 5:
- Coaker, T. H., 1959. *Bulletin of Entomological Research* 50: 487-506.
- Comstock, J. C., Miller, J. D., Schnell, R. J., 2001. *Sugar Tech* 3: 128-133.
- Daly, J. C., Gregg, P., 1985. *Bulletin of Entomological Research* 75: 169-184.
- Daugrois, J. H., Grivet, L., Roques, D., Hoarau, J. Y., Lombard, H., Glaszmann, J. C., D'Hont, A., 1996. *Theor. Appl. Genet.* 92: 1059-1064.
- Davis, F., Baker, G., Williams, W., 1995. *Journal-of-Agricultural-Entomology* 12: 55-65.
- De Barro, P. J., Sherratt, T. N., Carvalho, G. R., Nicol, D., Iyengar, A., Maclean, N., 1995. *Molecular Ecology* 4: 375-382.
- Deguine, J. P., Ferron, P., Russel, D., 2008. *Protection des cultures. De l'agrochimie à l'agroécologie.* Editions Quae, Versailles, France. pp.
- Dingkuhn, M., Luquet, D., Quilot, B., de Reffye, P., 2005. *Australian Journal of Agricultural Research* 56: 1289-1302.
- Eastop, V. F., 1966. *Australian Journal of Zoology* 14: 399-592.
- Ehler, L. E., 2006. *Pest Manag. Sci.* 62: 687-689.

- Endersbyl, N. M., Hoffmann, A. A., McKechnie, S. W., Weeks, A. R., 2007. *Entomologia experimentalis et applicata* 122: 253-263.
- Faure, G., Kleene, P., 2004. *Journal of agricultural education and extension* 10 37-49.
- Fergusson, A., 1980. *Biochemical Systematics and Evolution*. Blackie, Glasgow. pp.
- Fitch, M. M. M., Lehrer, A. T., Komor, E., Moore, P. H., 2001. *Plant Pathol.* 50: 676-680.
- Fitt, G. P., Mares, C. L., Llewellyn, D. J., 1994. *Biocontrol Sci. Technol.* 4: 535-548.
- Flint-Garcia, S. A., Thornsberry, J. M., Buckler IV, E. S., 2003. *Annu. Rev. Plant Biol.* 54: 357-374.
- Frey, M., Chomet, P., Glawischnig, E., Stettner, C., Grun, S., Winklmaier, A., Eisenreich, W., Bacher, A., Meeley, R., Briggs, S., Simcox, K., Gierl, A., 1997. *Science* 277: 698-699.
- Fye, R. E., 1972. *J. Econ. Entomol.* 65: 1410-1414.
- Gasperi, G., Guglielmino, C. R., Malacrida, A. R., Milani, R., 1991. *Heredity* 67: 347-356.
- Giré, M., Couilloud, R., 1982. *Coton et Fibres Tropicales* 37: 271-276.
- Goebel, R., 1999. *Caractéristiques biotiques du foreur de la canne à sucre *Chilo sacchariphagus* (Bojer, 1856) (Lepidoptera : Pyralidae) à l'île de la Réunion. Facteurs de régulation de ses populations et conséquences pour la lutte contre ce ravageur.* Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Gould, F., 1998. *Annu. Rev. Entomol.* 43: 701-726.
- Gould, F., Blair, N., Reid, M., Rennie, T. L., Lopez, J., Micinski, S., 2002. *PNAS* 99: 16581-16586.
- Green, W. M., de Billot, M. C., Joffe, T., van Staden, L., Bennet-Nel, A., du Toit, C. N. L., van der Westhuizen, L., 2003. *African Entomol.* 11: 21-29.
- Gregg, P. C., Fitt, G. P., Coombs, M., Henderson, G. S., 1994. *Bulletin of Entomological Research* 84: 17-30.
- Grisham, M. P., Pan, Y.-B., Legendre, B. L., Godshall, M. A., Eggleston, G., 2001. pp 434-438 in *Proc. Intern. Soc. Sugar Cane Technol. Congr.*
- Grisham, M. P., Pan, Y. B., White, W. H., Godshall, M. A., Legendre, B. L., Comstock, J. C., 2002. *J. Amer. Soc. Sugar Cane Technol.* 22: 125-126.
- Grivet, L., Arruda, P., 2001. *Current Opinion in Plant Biology* 5: 122-127.
- Gupta, P. K., Rustgi, S., Kulwal, P. L., 2005. *Plant Molecular Biology* 57: 461-485.
- Hackett, D. S., Gatehouse, A. G., 1982. *Bulletin of Entomological Research* 72: 409-422.
- Hammer, G. L., Kropff, M., Sinclair, T. R., Porter, J. R., 2002. *European Journal of Agronomy* 18: 15-31.
- Harris, F. A., Calhoun, D. S., Furr, R. E., Jr., 1994. pp 1007-1008 in *1994 Proceedings Beltwide Cotton.*
- Hillis, D. M., Moritz, C., 1990. *Molecular Systematics*. Sinauer Associates. Sinauer Associates, Sunderland, MA. pp.
- Hmimina, M., 1986. *Stratégie d'occupation des cultures et d'hivernation chez *Helicoverpa armigera* Hb. (Lepidoptera, Noctuidae): Essais de modélisation prévisionnelle.* Doctorat es Sciences, UDES, Marseille.
- Hmimina, M., Poitout, S., Buès, R., 1993. *Journal of Applied Entomology* 116: 273-283.
- Hoarau, J. Y., Grivet, L., Offmann, B., Raboin, L. M., Diorflar, J. P., Payet, J., Hellmann, M., D'Hont, A., Glaszmann, J. C., 2002. *Theor. Appl. Genet.* 105: 1027-1037.
- Jaccoud, D., Peng, K., Feinstein, D., Kilian, A., 2001. *Nucleic Acids Res* 29: e25.
- Jackson, R. E., Bradley, J. R. J., Van Duyn, J. W., 2003. pp 1017-1021 in *Proceedings of the 2003 Beltwide Cotton Conferences, Nashville, TN. National Cotton Council, Memphis, TN.*
- Jallas, E., Sequeira, R., Martin, P., Crétenet, M., Turner, S., McKinion, J., 1999. pp 393-396 in *Proceedings, 1999 Beltwide Cotton Conferences. National Cotton Council of America, Memphis, TN.*
- Jannoo, N., Grivet, L., Dookun, A., D'Hont, A., Glaszmann, J. C., 1999. *Theor. Appl. Genet.* 99: 1053-1060.
- Jordan, D. R., Casu, R. E., Besse, P., Carroll, B. C., Berding, N., McIntyre, C. L., 2004. *Genome* 47: 988-993.
- Kim, H., Lee, S., 2008. *Sysrematic Entomology* 33: 711-721.
- Kishore, P., 1991. *Journal of Entomological Research* 15: 163-168.
- Kogan, M., 1998. *Annu. Rev. Entomol.* 43: 243-270.
- Komarova, O. S., 1959. *Entomol. Rev.* 38: 318-325.
- Korman, A. K., Mallet, J., Goodenough, J. L., Graves, J. G., Hayes, J. L., Hendricks, D. E., Luttrell, R., Pair, S. D., M., W., 1993. *Annals of Entomological Society of America* 86: 182-188.
- Kranthi, K. R., Jadhav, D., Wanjari, R., Kranthi, S., Russell, D., 2001. *J. Econ. Entomol.* 94: 1736-1739.
- Kumar, H., 1992. *Journal of Economic Entomology* 85: 1736-1739.

Lehrer, A. T., Schenck, S., Fitch, M. M. M., Moore, P. H., Komor, E., 2001. pp 439-443 in
 Lei, T. T., Gaff, N., 2003. J. Econ. Entomol. 96 730-736.

Lockhart, B. E., Cronjé, C. P. R., 2000. Yellow leaf syndrome. pp. 291-295 in P. Rott, R. A. Bailey, J. C. Comstock, B. J. Croft, S. Saumtally (eds.) A guide to sugarcane diseases. CIRAD and ISSCT, Montpellier, France.

Luquet, D., Dingkuhn, M., Kim, H. K., Tambour, L., Clément-Vidal, A., 2006. Functional Plant Biology 33: 309-323.

Martin, T., Ochou, O. G., Hala-N'klo, F., Vassal, J.-M., Vaissayre, M., 2000. Pest Manag. Sci. 56: 549-554.

Martinié, J. F., 2003. Institut National Agronomique Paris-Grignon,

Mathes, R., Charpentier, L. J., 1969. . Varietal resistance in sugar cane to stalk moth borers. pp. 175-188 in J. R. Williams, J. R. Metcalfe, R. W. Mungomery, R. Mathes (eds.) Pests of sugar cane. Elsevier, Amsterdam.

Michel, B., Togola, M., Téréta, I., Traoré, N. N., 2000. Cahiers Agricultures 9: 109-115.

Nel, J. J. C., 1961. S. Afr. J. agric. Sci. 4: 576-586.

Nibouche, S., 1999. *Helicoverpa armigera* (Hübner, 1808) (Lepidoptera : Noctuidae). Série Les déprédateurs du cotonnier et Afrique tropicale et dans le reste du monde, 12. Cirad, Montpellier. 51 pp.

Nyambo, B. T., 1988. Crop Protection 7: 161-167.

Oakland, G. B., 1950. Biometrics 6: 59-67.

Orth, R. G., Head, G., Mierkowski, M., 2007. J. Chem. Ecol. 33: 1131-1148.

Ostrander, B., Coors, J., 1997. Crop-Science 37: 1741-1745.

Parmessur, Y., Aljanabi, S., Saumtally, S., Dookun-Saumtally, A., 2002. Plant Pathol. 51: 561-566.

Parnell, F. R., King, H. E., Ruston, D. F., 1949. Bulletin of entomological Research 39: 539-575.

Parsons, F. S., 1939. Bulletin of Entomological Research 30: 321-337.

Pashley, D. P., 1985. The use of population genetics in migration studies: a comparison of three noctuid species. pp. 305-324 in C. Barfield, R. Berger, C. G. Kennedy, D. R. Mac Kenzie (eds.) Movement and dispersal in biotic agents. Louisiana State University, Baton Rouge.

Pasteur, N., Pasteur, G., Bonhomme, F., Catalan, J., Britton-Davidian, J., 1987. Manuel Technique de Génétique par Électrophorèse des Protéines. Lavoisier, Paris. pp.

Pedigo, L. P., Hutchins, S. H., Higley, L. G., 1986. Annual Review of Entomology 31: 341-368.

Poitout, S., Buès, R., 1979. La Defense des Végétaux 195: 12-28.

Quilot, B., Génard, M., Kervella, J., Lescourret, F., 2004. Theor. Appl. Genet. 109: 440-449.

Quilot, B., Génard, M., Kervella, J., Lescourret, F., 2005. J. of Exp. Botany 56: 3083-30.

Raboin, L. M., 2005. Ecole nationale supérieure agronomique de Rennes,

Raboin, L. M., Oliveira, K. M., Lecunff, L., Telismart, H., Roques, D., Butterfield, M., Hoarau, J. Y., D'Hont, A., 2006. Theor. Appl. Genet. 112: 1382-1391.

Raboin, L. M., Pauquet, J., Butterfield, M., D'Hont, A., Glaszmann, J. C., 2008. Theoretical and Applied Genetics 116 701-714.

Ramalho, F. S., Mac Carty, J. C. J., Jenkins, J. N., Parrot, W. L., 1984. J. Econ. Entomol. 77: 591-594.

Rao, C. N., Panwar, V. P. S., 2000. Annals of Plant Protection Sciences 8: 145-149.

Rassaby, L., Girard, J. C., Lemaire, O., Costet, L., Irej, M. S., Kodja, H., Lockhart, B. E. L., Rott, P., 2004. Plant Pathol. 53: 117-125.

Rassaby, L., Girard, J. C., Letourmy, P., Chaume, J., Irej, M. S., Lockhart, B. E. L., Kodja, H., Rott, P., 2003. Eur. J. Plant Pathol. 109: 459-466.

Reed, G. L., Brindley, T. A., Showers, W. B., 1972. Annals of the Entomological Society of America 65: 658-662.

Reed, W., 1965. Bulletin of Entomological Research 56: 117-125.

Reffay, N., Jackson, P. A., Aitken, K. S., Hoarau, J. Y., D'Hont, A., Besse, P., McIntyre, C. L., 2005. Molecular Breeding 15: 367-381.

Reymond, M., Muller, B., Leonardi, A., Charcosset, A., Tardieu, F., 2003. Plant Physiology 131: 664-675.

Roome, R. E., 1979. Bulletin of Entomological Research 69: 149-160.

Ru, L.-J., Whao, J.-Z., Rui, C.-H., 2002. Acta Entomol. Sinica 45: 153-159.

Sadras, V. O., 1996. Oecologia 106: 1-18.

Saporta, G., 2006. Probabilité, Analyse des données et Statistique. Technip, Paris 622 pp.

Schenck, S., Hu, J. S., Lockhart, B. E., 1997. Sugar Cane 4: ?

- Schenck, S., Lehrer, A. T., 2000. *Plant Dis.* 84: 1085-1088.
- Scott, L. J., Lawrence, N., Lange, C. L., Graham, G. C., Hardwick, S., Rossiter, L., Dillon, M. L., Scott, K. D., 2006. *Journal of Economic Entomology* 99: 155-163.
- Silvie, P., 1991. *Coton et Fibres Tropicales* 46: 185-199.
- Silvie, P., Deguine, J. P., Nibouche, S., Michel, B., Vaissayre, M., 2001. *Crop Protection* 20: 297-301.
- Soliman, A. M., El-Attar, W. M., Elela, R. G. A., Abdel-Wahab, A. E., 1997. *Egyptian Journal of Agricultural Research* 75: 667-680.
- Stern, V. M., Smith, R. F., van den Bosch, R., Hagen, K. S., 1959. *Hilgardia* 29: 81-101.
- Stewart, S. D., Layton, M. B., Williams, M. R., Ingram, D., Maily, W., 2001. *Journal of Economic Entomology* 94: 388-396.
- Sundaramurthy, V. T., Gahukar, R. T., 1998. *Outlook on Agriculture* 27: 261-269.
- Taylor, L. R., 1984. *Annu. Rev. Entomol.* 29: 321-359.
- Teng, P. S., Bachelor, W. D., Pinnschmidt, H. O., Wilkerson, G. G., 1998. Simulation of pest effects on crops using coupled pest-crop models: the potential for decision support. pp. 221-266 in G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom, P. K. Thornton (eds.) *Understanding options for agricultural production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Titmarsh, I. J., Zalucki, M. P., Room, P. M., Evans, M. L., Gregg, P. C., Murray, D. A. H., 1991. Estimating the abundance of adults and immatures. pp. 49-68 in M. P. Zalucki (eds.) *Heliothis: research methods and prospects*. Springer-Verlag, New York, NY.
- Ukwungwu, M. N., 1984. *WARDA Technical Newsletter* 5: 20-21.
- Ukwungwu, M. N., 1990. *Insect Science and its Application* 11: 639-647.
- Vacher, C., Bourguet, D., Rousset, F., Chevillon, C., Hochberg, M. E., 2003. *J. Evol. Biol.* 16: 378-387.
- Vaissayre, M., Cauquil, J., Silvie, P., 1995. *Agriculture et Développement* 8: 3-23.
- Vanlerberghe-Masutti, F., Chavigny, P., 1998. *Molecular Ecology* 7: 905-914.
- Victoria, J. I., Avellaneda, M. C., Angel, J. C., Guzmán, M. L., 2005. *Proc. Intern. Soc. Sugar Cane Technol. Congr.* 25: 664-670.
- Viette, P., 1967. *Faune de Madagascar*. XX(2) *Insectes Lépidoptères Noctuidae Amphipyrae (part.) et Melicleptriinae*. ORSTOM CNRS, Paris. 344 pp.
- Vitale, J., Glick, H., Greenplate, J., Abdennadher, M., Traoré, O., 2008. *Crop Sci.* 48: 1958-1966.
- Wald, A., 1947. *Sequential Analysis*. Wiley, New York, USA. pp.
- Wardhaugh, K. G., Room, P. M., Greenup, L. R., 1980. *Bulletin of Entomological Research* 70: 113-131.
- Weathersbee, A. A., III, Hardee, D. D., 1994. *Journal of Economic Entomology* 87: 258-265.
- Wei, X., Jackson, P. A., McIntyre, C. L., Aitken, K. S., Croft, B., 2006. *Theor. Appl. Genet.* 114: 155-164.
- Widmer, M. W., Schofield, P., 1983. *Heliothis dispersal and migration*. Annotated Bibliographies Series N° 2, Tropical Development and Research Institute, London. 41 pp.
- Willoquet, L., Alazegui, F. A., Castilla, N., Fernandez, L., Fisher, K. S., Peng, S., Teng, P. S., Srivastava, R. K., Singh, H. M., Zhu, D., Savary, S., 2004. *Phytopathology* 94: 672-682.
- Willoquet, L., Aubertot, J. N., Lebard, S., Robert, C., Lannou, C., Savary, S., 2008. *Field Crops Research* 107: 12-28.
- Wilson, A. G. L., Lewis, T., Cunningham, R. B., 1979. *Bulletin of Entomological Research* 69: 97-109.
- Wilson, L. T., 1982. *Entomophaga* 27: 45-50.
- Wu, K.-M., Guo Y.-Y., Gao, S.-S., 2002. *J. Econ. Entomol.* 95: 832-837.
- Xia, J. Y., Cui, J. J., Ma, L. H., Dong, S. X., Cui, X. F., 1999. *Acta Gossypii Sinica* 11: 57-64.
- Yin, X., Kropff, M. J., Stam, P., 1999. *Heredity* 82: 415-421.
- Yin, X., Stam, P., Kropff, M. J., Schapendonk, A., 2003. *Agronomy Journal* 95: 90-113.
- Zarpas, K. D., Margaritopoulos, J. T., Stathi, L., Tsitsipis, J. A., 2006. *International Journal of Pest Management* 52: 225-232.
- Zhou, X., Faktor, O., Applebaum, S. W., Coll, M., 2000. *Heredity* 85: 251-256.